



©Héctor Santos Díez

Evaluación de un sistema constructivo modular de aluminio extrusionado según el estándar Passivhaus para componentes

Alumna: Arq. Tatiana Karenina Yakimchuk

Director: Dr. Arq. Víctor Hermo Sánchez

Trabajo Fin de Máster
Máster Universitario en Edificación Sostenible
Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica
Universidad de A Coruña
Curso 2021-2022
Junio de 2022



UNIVERSIDADE
DA CORUÑA

Agradecimientos

A Fundación Carolina y a la Universidad de A Coruña, por otorgarme una beca de estudios en el marco del Programa de Becas del Bicentenario de la Fundación, sin la cual mi participación en el Máster Universitario en Edificación Sostenible y la elaboración del presente Trabajo Fin de Máster no habrían sido posibles. Gracias por permitirme vivir una experiencia educativa internacional absolutamente enriquecedora, tanto en el plano personal como profesional.

A mi director, Dr. Arq. Víctor Hermo Sánchez, por brindarme su tiempo y saberes antes y durante la realización de este trabajo. Sin su inestimable ayuda y dedicación, no habría podido alcanzar los objetivos planteados.

A la Dra. Arq. Patricia Liñares Méndez, de Proyectopía S.L., por la información brindada sobre el sistema constructivo objeto de esta investigación, y por su amabilidad y profesionalismo al momento de resolver mis inquietudes.

Al Arq. Tec. Martín Amado Pousa, certificador y diseñador Passivhaus, por sus profundos conocimientos sobre el estándar Passivhaus y su completa predisposición al momento de transmitírmelos.

Al Sr. Daniel Morales Gorostiza, de Vekaplast Ibérica S.A.U., por la información brindada sobre la carpintería con certificación Passivhaus.

Al Ing. Daniel Rüdissler, de HTflux Engineering GmbH, por el otorgamiento de la licencia de estudiante del software HTflux.

A mis padres, Juan Carlos y Patricia, y a mi familia y amigos. Gracias por su apoyo incondicional durante esta invaluable experiencia, que finaliza con la presentación de este Trabajo Fin de Máster.

Resumen

Para cumplir las metas establecidas a nivel internacional relacionadas con la reducción del consumo de energía y de las emisiones de dióxido de carbono, es necesario mitigar el impacto del sector de la edificación, responsable en 2020 del 36% del consumo mundial de energía final y del 37% de las emisiones de dióxido de carbono. En los últimos años, se ha hecho una revisión tanto de las técnicas y materiales utilizados en la industria, como de las exigencias que las entidades gubernamentales nacionales e internacionales imponen sobre las edificaciones. En la Unión Europea, desde diciembre de 2020, los edificios de consumo de energía casi nulo se han convertido en el nuevo paradigma edificatorio. El estándar de construcción Passivhaus garantiza el cumplimiento de dichas exigencias, ya que demanda el uso de componentes constructivos de alta calidad térmica. Conforme a este estándar, es posible certificar edificios y componentes constructivos de prestaciones energéticas óptimas.

En este contexto surge el sistema constructivo objeto de esta investigación. Se trata de un sistema constructivo modular de paneles aluminio extrusionado producido en Pontevedra, España. Se utiliza en la actualidad en la construcción de viviendas en el noroeste del país. El objetivo fue evaluar su comportamiento higrotérmico según los requerimientos del estándar Passivhaus para componentes, adecuados para clima cálido templado. Se analizaron los requerimientos de higiene, confort, eficiencia y humedad exigidos en el estándar. Asimismo, se estudiaron las soluciones adoptadas en el sistema constructivo mediante la simulación del comportamiento higrotérmico de catorce detalles constructivos.

Por un lado, la comparación reveló que ocho de los catorce detalles cumplen el criterio de higiene. Seis encuentros con ventana mostraron un comportamiento higrotérmico inferior al estándar Passivhaus, tanto en el criterio de higiene como en el criterio de confort. Por otro lado, todos los detalles cumplen el criterio de eficiencia relacionado con la transmitancia térmica del componente exterior. El estudio reveló que seis de los ocho detalles estrictamente opacos cumplen con el factor de temperatura exigido en el criterio de eficiencia. Además, se demostró que cinco de los ocho encuentros estrictamente opacos poseen una transmitancia térmica lineal inferior al límite establecido por el estándar. A partir de estos resultados, se propusieron modificaciones en los detalles constructivos que presentaron deficiencias. Las modificaciones abarcaron tres aspectos: la materialidad, las dimensiones y las conexiones entre componentes del sistema constructivo. Tras simular los nuevos detalles, se comprobó que las modificaciones propuestas pueden optimizar su comportamiento higrotérmico.

Palabras clave

Edificios de consumo de energía casi nulo, Sistema de paneles tipo *cassette*, Criterios Passivhaus, Comportamiento higrotérmico, Simulación de flujo de calor

Abstract

In order to meet the goals established on an international level concerning the reduction of energy consumption and CO₂ emissions, it is necessary to mitigate the impact of the building sector, responsible for 36% of global final energy consumption and 37% of energy-related CO₂ emissions in 2020. Recently, both the techniques and the materials used in the construction industry have been reviewed, as well as the requirements that national and international government organizations impose on buildings. In the European Union, since December 2020, nearly zero energy buildings -nZEB- have become the new building paradigm. The Passivhaus construction standard guarantees compliance with these requirements, since it requires the use of building components with high thermal qualities. In accordance with this standard, it is possible to validate buildings and construction components with optimal energy performance.

In this context, the construction system object of this research emerges. It is a modular construction system of extruded aluminum panels produced in Pontevedra, Spain. Nowadays it is used in residential constructions in the northwest of the country. The objective was to assess its hygrothermal performance according to the criteria of the Passivhaus standard for components, suitable for warm temperate climates. Hygiene, comfort, efficiency and moisture criteria indicated in the standard were analyzed. The solutions adopted in the construction system were also studied by means of hygrothermal performance simulation of fourteen construction details.

On the one hand, the comparison revealed that eight of the fourteen details meet the hygiene criterion. Six window connections showed a hygrothermal performance below the Passivhaus standards both in the hygiene criterion and in the comfort criterion. On the other hand, all details meet the efficiency criterion concerning the thermal transmittance of the external component. The study revealed that six of the eight purely opaque details comply with the temperature factor required in the efficiency criteria. In addition, it was shown that five of the eight purely opaque details have a linear thermal transmittance that complies with the limit established by the standard. Based on these results, modifications were proposed in the construction details that presented deficiencies. Modifications covered three aspects: materials, dimensions and connections between components of the construction system. After simulating the new details, it was confirmed that the modifications suggested are able to optimize their hygrothermal performance.

Keywords

Nearly zero energy buildings, Liner tray system, Passivhaus criteria, Hygrothermal performance, Heat flow simulation

Resumo

Para cumprir cos obxectivos establecidos a nivel internacional relativos á redución do consumo enerxético e das emisións de dióxido de carbono, é necesario mitigar o impacto do sector da construción, responsable do 36% do consumo global de enerxía final e do 37% das emisións de dióxido de carbono relacionadas coa enerxía en 2020. Nos últimos anos revisáronse tanto as técnicas como os materiais empregados no sector da construción, así como as esixencias que as organizacións gobernamentais nacionais e internacionais impoñen aos edificios. Na Unión Europea, dende decembro de 2020, os edificios de enerxía case nula convertéronse no novo paradigma da edificación. A norma de construción Passivhaus garante o cumprimento destes esixencias, xa que require o uso de compoñentes de construción con altas calidades térmicas. De acordo con esta norma, é posible certificar edificios e compoñentes da construción cun rendemento enerxético óptimo.

Neste contexto, xorde o sistema construtivo obxecto desta investigación. Trátase dun sistema de construción modular de paneis de aluminio extruído producido en Pontevedra, España. Actualmente utilízase na construción de vivendas no noroeste do país. O obxectivo era avaliar o seu comportamento higrotérmico segundo os criterios da norma Passivhaus para compoñentes, indicado para climas temperados cálidos. Analizáronse os criterios de hixiene, confort, eficiencia e humidade establecidos na norma. Así mesmo, estudáronse as solucións adoptadas no sistema construtivo mediante a simulación do comportamento higrotérmico de catorce detalles construtivos.

Por unha banda, a comparativa revelou que oito dos catorce detalles cumpren o criterio de hixiene. Seis conexións de fiestras mostraron un rendemento higrotérmico inferior ao estándar Passivhaus, tanto no criterio de hixiene como no de confort. Por outra banda, todos os detalles cumpren o criterio de eficiencia relativo á transmitancia térmica do compoñente externo. O estudo revelou que seis dos oito detalles estritamente opacos cumpren co factor de temperatura esixido no criterio de eficiencia. Ademais, demostrouse que cinco dos oito detalles estritamente opacos teñen unha transmitancia térmica lineal que cumpre co límite establecido pola norma. A partir destes resultados propuxéronse modificacións nos detalles construtivos que presentaban deficiencias. As modificacións abarcaron tres aspectos: materialidade, dimensións e conexións entre compoñentes do sistema construtivo. Tras simular os novos detalles, comprobouse que as modificacións propostas poden optimizar o seu comportamento higrotérmico.

Palabras clave

Edificios de enerxía case nula, Sistema de paneis tipo casete, Criterios Passivhaus, Comportamento higrotérmico, Simulación de fluxo de calor

Índice

Parte I – Introducción	01
1. Planteamiento del problema	02
2. Estado de la técnica	04
2.1. Edificios de consumo de energía casi nulo	04
2.2. El estándar Passivhaus	09
2.3. El sistema constructivo	17
3. Justificación	24
4. Objetivos	25
5. Metodología	26
Parte II – Marco conceptual	28
6. Fundamentos teóricos	29
6.1. Transmisión de calor	29
6.2. Difusión de vapor de agua	32
6.3. Puentes térmicos	37
7. El estándar Passivhaus para componentes	42
7.1. Zonas climáticas	42
7.2. Criterios de certificación	44
7.3. Detalles constructivos evaluables	48
8. El sistema constructivo modular de aluminio extrusionado	50
8.1. Componentes y materiales	50
8.2. Detalles constructivos	58
Parte III – Desarrollo y resultados	68
9. Parámetros de simulación	69
9.1. Condiciones de simulación	69
9.2. Determinación de detalles constructivos evaluables	77
9.3. Etapas del proceso de simulación	78

10. Cálculo y simulación del sistema constructivo	81
10.1. Encuentro en esquina	81
10.2. Encuentros con solera	84
10.3. Encuentros con forjado	90
10.4. Encuentros con carpintería	96
10.5. Encuentros con cubierta	120
11. Comparación de resultados parciales con el estándar Passivhaus	128
12. Modificación del sistema constructivo	131
12.1. Criterio de confort: cambio de ventana instalada	131
12.2. Criterio de eficiencia: reducción de puentes térmicos	135
12.3. Criterio de higiene y criterio de eficiencia: factor de temperatura	137
12.4. Criterio de humedad: eliminación de condensación intersticial	139
13. Cálculo y simulación del sistema constructivo modificado	141
13.1. Encuentros con forjados	141
13.2. Encuentros con carpinterías	144
13.3. Encuentros con cubiertas	151
14. Comparación de resultados finales con el estándar Passivhaus	153
Parte IV – Conclusiones	157
15. Cumplimiento de los objetivos	158
16. Certificación del sistema constructivo	162
17. Implementación de las modificaciones	164
18. Futuras líneas de investigación y limitaciones encontradas	166
19. Reflexiones finales	167
Bibliografía	168

Parte I

Introducción

1. Planteamiento del problema
2. Estado de la técnica
3. Justificación
4. Objetivos
5. Metodología



1. Planteamiento del problema

Comprender la influencia del sector de la edificación en el total de la energía consumida por el hombre en la actualidad ha derivado en una revisión tanto de las técnicas y materiales utilizados en la industria, como de las exigencias que las entidades gubernamentales a nivel nacional e internacional imponen sobre las edificaciones. En el caso particular de la Unión Europea, desde el 31 de diciembre de 2020, los **edificios de consumo de energía casi nulo** se han convertido en el nuevo paradigma edificatorio.

Para cumplir con las exigencias legales emanadas de las directrices europeas y con las legislaciones nacionales que las trasponen, los profesionales de la construcción precisan recurrir a materiales y **componentes constructivos de excelente comportamiento higrotérmico**. Su uso permite construir edificios con prestaciones energéticas óptimas, a la altura de los requerimientos de cada país miembro. En ese sentido, el estándar de construcción de origen alemán **Passivhaus** garantiza el cumplimiento de dichas exigencias, ya que demanda el uso de instalaciones de alto rendimiento y componentes constructivos que aseguren una baja transmitancia térmica y un alto nivel de estanqueidad de la envolvente.

Conforme al estándar Passivhaus es posible certificar tanto el consumo de energía casi nulo de los edificios como los componentes y equipos que ayudan a alcanzar tal nivel de consumo. Por un lado, utilizar componentes con certificación Passivhaus simplifica la tarea de los profesionales en las primeras etapas del proyecto, cuando se deben evaluar y seleccionar componentes constructivos de alta eficiencia, pero no se cuenta con datos verificados de su comportamiento energético. Por otro lado, el uso de componentes certificados de acuerdo a este estándar asegura a los profesionales que el edificio resultante tendrá un nivel de calidad Passivhaus y, por lo tanto, también podrá ser certificado conforme a ese estándar de construcción.

Dentro de este panorama en el que las exigencias legales son más rigurosas y el sector de la edificación, a través de la aplicación del estándar Passivhaus, busca soluciones tecnológicas que igualen o superen las regulaciones gubernamentales, surge el sistema constructivo objeto de esta investigación. Se trata de un **sistema constructivo modular de aluminio extrusionado** producido en Pontevedra, España, diseñado de acuerdo a las premisas de asequibilidad, fácil puesta en obra, bajo consumo energético y aplicabilidad en la resolución de viviendas nuevas y aisladas. Si consideramos el impacto que tienen los edificios residenciales en el total del consumo de energía del sector de la edificación, resulta evidente la necesidad de optar por soluciones constructivas de alta eficiencia al momento de construir viviendas nuevas.

Este sistema ha sido aplicado en la construcción de viviendas en el noroeste de España, y aún sigue siendo analizado y mejorado desde el punto de vista de su comportamiento energético. Por lo tanto, esta investigación es un nuevo aporte a ese análisis, enfocada

en las posibilidades de que este sistema constructivo se convierta en una opción que cumpla las exigencias legales, alcance un comportamiento energético en acuerdo al estándar Passivhaus, y contribuya a la minimización del impacto energético del parque residencial nuevo.

Por lo expuesto, el presente trabajo aborda la **evaluación de un sistema constructivo modular de aluminio extrusionado según el estándar Passivhaus para componentes constructivos**. Dado que el estándar plantea distintos requisitos según la zona climática en la que se utilice el componente, la evaluación se lleva a cabo en base al clima de España (país de origen del sistema) que presente los requisitos más rigurosos. Por lo tanto, se pretende evaluar el sistema constructivo considerando las exigencias establecidas para componentes constructivo en clima cálido templado.

2. Estado de la técnica

2.1. Edificios de consumo de energía casi nulo

Situación energética global

En 2020, de acuerdo al último reporte del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 36% del consumo global de energía final provino de las edificaciones, en tanto estas fueron responsables del 37% de las emisiones de dióxido de carbono vinculadas al consumo de energía.¹ Este porcentaje incluye la participación de la industria de la construcción y la manufactura de materiales. El sector residencial en particular, fue responsable del 22% del consumo de energía final y del 17% de las emisiones a nivel mundial, como lo refleja la Figura 1.

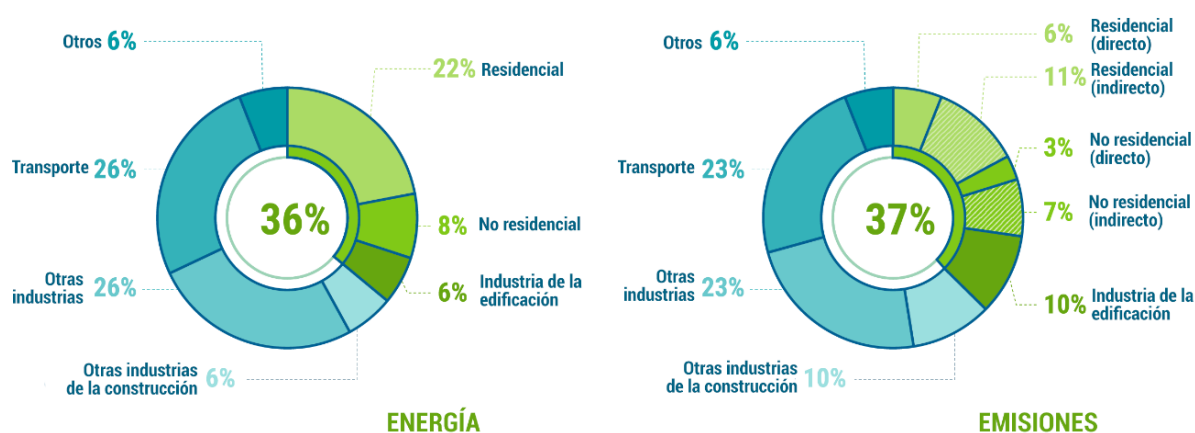


Figura 1. Incidencia de la edificación en el consumo global de energía final y en las emisiones de dióxido de carbono. Fuente: Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.

En términos absolutos, el total del consumo en el sector de la edificación en 2020 equivalió a 149 exajoules, un valor superior a los 144 exajoules consumidos en 2015 (año de la firma del Acuerdo de París), aunque inferior al pico de 150 exajoules alcanzado en 2019. Las emisiones de dióxido de carbono, por otro lado, pasaron de las 13,1 gigatoneladas en 2015 a 11,7 gigatoneladas en 2020, un nivel similar al registrado en 2007. El informe indica que esta reducción de las emisiones fue producto mayoritariamente de los efectos de la pandemia de Covid-19, y en menor medida de una serie de esfuerzos por descarbonizar el sector energético.

Ahora bien, el reporte indica también que esta tendencia no continuará una vez desaparecidos los efectos de la pandemia y que, por lo tanto, si se quiere cumplir con las metas establecidas por los países firmantes del Acuerdo de París, es necesario reducir inmediata y significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero del sector de la edificación.

¹ Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, *2021 Global status report for buildings and construction: Towards a zero-emissions, efficient and resilient buildings and construction sector*, (Nairobi: 2021), https://globalabc.org/sites/default/files/2021-10/GABC_Buildings-GSR-2021_BOOK.pdf

Asimismo, el reporte revela algunas mejoras ocurridas en 2020. Por ejemplo, aumentó en un 54,6% el número de Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (conjunto de medidas que cada país firmante del Acuerdo propone para reducir sus emisiones) que incluyen acciones directas sobre la edificación, respecto a lo informado en 2015. De igual manera, las inversiones en el sector de la eficiencia energética de los edificios aumentaron un 39,5% respecto a los valores de 2015, lideradas especialmente por la Unión Europea. Además, se certificaron como edificios sostenibles o “verdes” un 13,9% más de edificios que en 2019. Aun así, si se descuentan los efectos de la pandemia de Covid-19, la descarbonización solo alcanzó el 40% de los previsto en el Acuerdo de París para 2020.

En este contexto en el que se promueven acciones eficaces que reduzcan el consumo energético y las emisiones de las edificaciones, surge el concepto de los **edificios de consumo de energía casi nulo** (nZEB por sus siglas en inglés, *nearly zero energy buildings*).

Marco legal en la Unión Europea y España

La Unión Europea recoge el término edificio de consumo de energía casi nulo en la Directiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo y del Consejo del 19 de mayo de 2010 relativa a la eficiencia energética de los edificios (EPBD por sus siglas en inglés, *Energy Performance of Buildings Directive*), que es la refundición de la primera directiva de eficiencia energética de los edificios, la Directiva 2002/91/CE del Parlamento Europeo y del Consejo del 16 de diciembre de 2002. Ya en su primera versión, la EPBD consideraba que el sector de la vivienda y los servicios era responsable del 40% del consumo final de energía de la Comunidad Europea.² La EPBD de 2010 considera que reducir el consumo en el sector de la edificación es necesario para disminuir la dependencia energética y las emisiones de la Unión, cumplir el Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, y cumplir con el compromiso de reducir para 2020 un 20% las emisiones de gases de efecto invernadero respecto a los valores de 1990. Para ello, establece que, a partir del 31 de diciembre de 2020, todos los edificios nuevos sean edificios de consumo de energía casi nulo.³

En 2018, se realizó una modificación de la EPBD mediante la Directiva (UE) 2018/844 del Parlamento Europeo y del Consejo de 30 de mayo de 2018. Esta modificación recoge los nuevos compromisos ambientales asumidos por la Unión. En ella se considera que el parque inmobiliario es responsable del 36% de las emisiones de dióxido de carbono de la Unión Europea y plantea que se deben reducir las emisiones de gases de efecto

² Directiva 2002/91/CE del Parlamento Europeo y del Consejo del 16 de diciembre de 2002, relativa a la eficiencia energética de los edificios, Diario Oficial de las Comunidades Europeas L 1, 4 de enero de 2003.

³ Directiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de mayo de 2010, relativa a la eficiencia energética de los edificios, Diario Oficial de la Unión Europea L 153, 18 de junio de 2010.

invernadero en un 40% en 2040 respecto a los valores de 1990, además de contar con un sistema energético descarbonizado para 2050.⁴ En 2021, con la propuesta de Directiva del Parlamento Europeo y del Consejo, se planteó una nueva revisión de la EPBD todavía más ambiciosa, en la que se establece que para 2030 todos los edificios nuevos sean de cero emisiones, imponiendo así un estándar aún más exigente que el de edificio de consumo de energía casi nulo.⁵

España, por su parte, traspuso la EPBD del año 2002 mediante el Real Decreto 47/2007 y el Real Decreto 314/2006, que contenía el Documento Básico de Ahorro de Energía del Código Técnico de la Edificación (CTE-DB-HE 2006).⁶ Tal y como sucediera a nivel europeo, las regulaciones españolas fueron actualizándose mediante la creación de nuevas versiones del CTE. De esta manera, se incrementaron los niveles de exigencia de eficiencia energética en los edificios hasta la última modificación realizada en 2020, que recoge el término edificio de consumo de energía casi nulo.⁷

Definición de edificio de consumo de energía casi nulo

Un edificio de consumo de energía casi nulo, en los términos de la Directiva 2010/31/UE, es un edificio con un **nivel de eficiencia energética muy alto**, en el que la cantidad casi nula o muy baja de energía requerida debería estar cubierta, en muy amplia medida, por energía procedente de fuentes renovables producidas *in situ* o en el entorno. La definición cualitativa de nZEB planteada por la EPBD da lugar a distintas interpretaciones y resulta complejo derivar de ella una definición cuantitativa debido a la variedad de factores que intervienen.⁸ De hecho, la amplitud de la definición ha dado lugar a distintas aproximaciones.⁹ La Figura 2 indica cuatro aspectos que intervienen en la definición de un nZEB.

⁴ Directiva (UE) 2018/844 del Parlamento Europeo y del Consejo de 30 de mayo de 2018 por la que se modifica la Directiva 2010/31/UE relativa a la eficiencia energética de los edificios y la Directiva 2012/27/UE relativa a la eficiencia energética, Diario Oficial de la Unión Europea L 156, 19 de junio de 2018.

⁵ Propuesta de Directiva del Parlamento Europeo y del Consejo, de 15 de diciembre de 2021, relativa a la eficiencia energética de los edificios (refundición).

⁶ Luis López Ochoa et al., "Environmental and energy impact of the EPBD in residential buildings in cold Mediterranean zones: The case of Spain", *Energy and Buildings* 150 (2017), <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.06.023>

⁷ David Bienvenido Huertas et al., "Analysing the inequitable energy framework for the implementation of nearly zero energy buildings (nZEB) in Spain", *Journal of Building Engineering* 35 (2021), <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.102011>

⁸ Bogdan Atanasiu et al., *Principles for nearly zero-energy buildings: Paving the way for effective implementation of policy requirements*, (Buildings Performance Institute Europe, 2011), https://www.bpie.eu/wp-content/uploads/2015/10/HR_nZEB-study.pdf

⁹ Delia D'Agostino y Livio Mazzarella, "What is a Nearly zero energy building? Overview, implementation and comparison of definitions", *Journal of Building Engineering* 21 (2019), <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.10.019>; Ala Hasan, Ayman Mohamed y Hamdy Mohamed, "Net- and Nearly- Zero Energy Buildings: A Review of the Definitions and Case Studies", en *Proceedings of the Sixth International Conference on Heating, Ventilation and Air-Conditioning*, (Teherán: 2015), https://www.researchgate.net/publication/280443863_Net-_and_Nearly-Zero_Energy_Buildings_A_Review_of_the_Definitions_and_Case_Studies

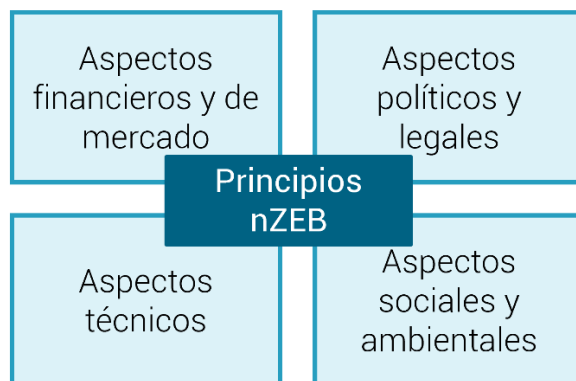


Figura 2. Aspectos que interactúan en la definición de nZEB. Fuente: Bogdan Atanasiu et al.

Asimismo, los principios que definen un edificio de consumo de energía casi nulo son: la **demanda de energía**, el **porcentaje de la demanda a cubrir con energías renovables**, el **consumo de energía primaria** y **emisiones de dióxido de carbono** asociadas.¹⁰ La definición cuantitativa de nZEB debe establecer los límites de esos principios.

En cualquier caso, según la Recomendación (UE) 2016/1318 de la Comisión, de 29 de julio de 2016, es responsabilidad de los Estados miembros definir cuantitativamente qué es una "eficiencia energética muy alta", así como el significado de "cubierta en muy amplia medida por energía procedente de fuentes renovables", al momento de trasponer la EPBD a la legislación nacional. De esta manera, se tienen en cuenta las condiciones locales particulares de cada país. En efecto, la EPBD promueve la eficiencia energética de los edificios teniendo en cuenta las condiciones climáticas, el entorno ambiental interior y la rentabilidad en términos de coste-eficacia.¹¹

Existen estudios que mencionan las heterogeneidades existentes entre países de la Unión, ligadas a las condiciones climáticas, las tipologías edilicias y los costos de implementar los nZEB, que condicionan las medidas de eficiencia energética que cada país puede adoptar.¹² La Recomendación (UE) 2016/1318 de la Comisión plantea que los indicadores numéricos que cada país establece en pos de obtener su propia definición cuantitativa de nZEB no son comparables, porque las metodologías utilizadas para llegar a dichos valores varían de país en país.

En el caso de España, se considera edificio de consumo de energía casi nulo a todo edificio nuevo o existente que cumpla con las exigencias reglamentarias establecidas en el Documento Básico de Ahorro de Energía. Es decir, cumplir con la regulación nacional basta para considerar un edificio como de consumo de energía casi nulo. Sin

¹⁰ Bogdan Atanasiu et al., *Principles for nearly zero-energy buildings*.

¹¹ Beatriz Rodríguez Soria et al., "Review of international regulations governing the thermal insulation requirements of residential buildings and the harmonization of envelope energy loss", *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 34 (2014), <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.03.009>

¹² Delia D'Agostino y Livio Mazzarella, "What is a Nearly zero energy building?"; Shady Attia et al., "Overview and future challenges of nearly zero energy buildings(nZEB) design in Southern Europe", *Energy and Buildings* 155 (2017), <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.09.043>

embargo, algunos autores cuestionan que la regulación española en eficiencia energética sea adecuada para la implementación del concepto de nZEB, ya que detectaron que la clasificación climática utilizada en el CTE resulta inadecuada e insuficiente para reflejar las particularidades del territorio.¹³

Implementación del paradigma nZEB

En relación a los desafíos que enfrenta la implementación del paradigma de los nZEB en la edificación en Europa, algunos autores consideran que las tecnologías actuales permiten alcanzar las metas planteadas para los edificios de consumo de energía casi nulo¹⁴, mientras que otros plantean que existen barreras de tipo sociales y económicas que vuelven difícil su implementación, especialmente en países del sur de Europa.¹⁵ A su vez, algunos estiman que la brecha entre los niveles de rentabilidad y el nivel nZEB se acortará progresivamente debido, por ejemplo, a los cambios en los costes de la tecnología (maduración del mercado y aumento en el volumen de producción de materiales y sistemas eficientes).¹⁶ Alcanzar niveles óptimos de rentabilidad está explícito en la EPBD, porque define el nivel mínimo de exigencia tanto para edificios nuevos como renovaciones de edificios existentes.¹⁷

Paralelamente, algunos autores afirman que alcanzar niveles nZEB es factible en edificios nuevos, pero hacerlo en edificios existentes resulta un mayor desafío¹⁸, a lo que suscriben otros investigadores.¹⁹ Paradójicamente, se cree que los mayores ahorros energéticos en el sector de la edificación podrían ocurrir rehabilitando edificios antiguos que hoy en día no cuentan con aislamiento.²⁰

En relación a la implementación del paradigma a nivel nacional, por un lado, los Estados miembros del sur aún se encuentran en búsqueda de las soluciones más adecuadas que tengan en cuenta propio contexto climático, cultural, social y técnico. Por otro lado, los Estados miembros del norte lograron desarrollar una definición y adaptar las tecnologías constructivas del nZEB que son efectivas para sus climas, donde predomina el consumo de energía para calefacción. Varios países optaron por cumplir con el estándar de aplicación voluntaria **Passivhaus**²¹ para garantizar que las

¹³ David Bienvenido Huertas et al., "Analysing the inequitable energy framework".

¹⁴ Andreas Hermelink et al., *Towards nearly zero-energy buildings Definition of common principles under the EPBD: Final report*, (Ecofys, 2013), https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/nzeb_full_report.pdf

¹⁵ Shady Attia et al., "Overview and future challenges".

¹⁶ Bogdan Atanasiu et al., *Principles for nearly zero-energy buildings*.

¹⁷ Beatriz Rodríguez Soria et al., "Review of international regulations".

¹⁸ Marina Economidou et al., "Review of 50 years of EU energy efficiency policies for buildings", *Energy and Buildings* 225 (2020), <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110322>

¹⁹ Véase nota 15.

²⁰ Delia D'Agostino y Livio Mazzarella, "What is a Nearly zero energy building?".

²¹ Véase nota 15.

demandas de energía de las edificaciones en su territorio se correspondan con las de un edificio de consumo de energía casi nulo.

Entonces, nos encontramos en un contexto en el que las directivas son cada vez más exigentes y los Estados miembros revisan periódicamente sus regulaciones nacionales. En consecuencia, se plantean nuevos desafíos a los profesionales del sector de la edificación. Asimismo, en muchos países de la UE se ha acudido al estándar Passivhaus para definir qué es un edificio de consumo de energía casi nulo. En esos casos, se han establecido y puesto en práctica las medidas necesarias para que el sector de la edificación reduzca sus consumos energéticos y sus emisiones de dióxido de carbono.

2.2. El estándar Passivhaus

Surgimiento del estándar

El concepto Passivhaus nace de la mano de Wolfgang Feist y Bo Adamson en 1988, en el marco de una estancia de investigación de Feist en la Universidad de Lund (Suecia). En 1990, llevan adelante el primer prototipo de vivienda que aplica los principios de un edificio Passivhaus: la casa pasiva Kranichstein, en Darmstadt, Alemania (Figura 3). Se trata de la primera vivienda multifamiliar habitada en la que se documentó un consumo de energía para calefacción por debajo de los 10kWh/m²año, gracias a la aplicación de una serie de medidas orientadas a la conservación del calor: protección térmica a través un aislamiento óptimo de la envolvente, y recuperación de calor mediante ventilación con recuperador de calor.²² Nace así la definición de edificio Passivhaus: edificio que puede garantizar el confort climático suministrando la energía para la calefacción y la refrigeración solo a través del aire de la ventilación.²³

En 1993, Feist publicó los resultados de su investigación sobre las casas pasivas y demostró su factibilidad de implementación en la tesis "Casas pasivas en Europa Central". En 1996, sin discontinuar las mediciones del prototipo en uso que confirmaban lo planteado a nivel teórico, fundó en Darmstadt el **Passivhaus Institut** o Instituto Passivhaus, centro de investigación independiente formado por un equipo interdisciplinario de profesionales. Bajo esta organización, el concepto Passivhaus se desarrolló y consolidó hasta convertirse en un estándar de construcción de aplicación voluntaria.

²² Wolfgang Feist, "The world's first Passive House, Darmstadt-Kranichstein, Germany", Passipedia, Passivhaus Institut, consultado el 25 de mayo de 2022, [https://passipedia.org/examples/residential_buildings/multi-family_buildings/central_europe/the_world_s_first_passive_house_darmstadt-kranichstein_germany?s\[\]=kranichstein](https://passipedia.org/examples/residential_buildings/multi-family_buildings/central_europe/the_world_s_first_passive_house_darmstadt-kranichstein_germany?s[]=kranichstein)

²³ Jürgen Schnieders, Wolfgang Feist y Ludwig Rongen, "Passive Houses for different climate zones", *Energy and Buildings* 105 (2015), <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.07.032>



Figura 3. La primera vivienda construida según el concepto Passivhaus. Fuente: Wolfgang Feist.

Principios y requerimientos del estándar

Los estándares de construcción como Passivhaus se centran en controlar criterios específicos, a diferencia de los sistemas de certificación medioambientales, que intentan abarcar la mayor cantidad posible de aspectos relacionados al impacto ambiental de los edificios.²⁴ En efecto, los estándares en general se caracterizan por ser más riguroso en aspectos energéticos, e incluso ir más allá de la normativa oficial, pero no abarcan todos los criterios de la sostenibilidad en la edificación. Passivhaus, en particular, se enfoca en el **control de la demanda de calefacción y refrigeración** mediante el desarrollo de **componentes pasivos** de la arquitectura y el apoyo de **sistemas activos** energéticamente eficientes.²⁵

Los cinco **principios** en los que se basa el estándar, indicados por el Passivhaus Institut²⁶ e ilustrados en la Figura 4, son:

- **Aislamiento térmico de la envolvente.** Todo componente opaco de la envolvente debe poseer un nivel de aislamiento térmico muy alto. En climas fríos templados, este nivel de aislamiento equivale a unos $0,15\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ de transmitancia térmica.
- **Aislamiento térmico de carpinterías.** Los marcos deben estar correctamente aislados y deben contar con vidrios bajo emisivos con cámara de aire rellena de argón o kriptón para evitar la transmisión de calor. En climas fríos templados, esta exigencia equivale a un valor máximo de transmitancia térmica de $0,80\text{W}/\text{m}^2\text{K}$.
- **Ventilación con recuperación de calor.** Es clave contar con un sistema de ventilación eficiente con recuperación de calor para proveer de una buena calidad

²⁴ Michael Wassouf, *De la casa pasiva al estándar Passivhaus: La arquitectura pasiva en climas cálidos*, (Barcelona: Gustavo Gili, 2014).

²⁵ Véase nota 24.

²⁶ Passivhaus Institut, "Passive House requirements", Passive House, consultado el 25 de mayo de 2022, https://passivehouse.com/02_informations/02_passive-house-requirements/02_passive-house-requirements.htm

de aire interior y ahorrar energía. Al menos el 75% del calor del aire expulsado se debe transferir al aire fresco que ingresa al edificio mediante un intercambiador.

- **Hermeticidad del edificio.** La pérdida no controlada de aire a través de juntas y fisuras debe ser menor al 0,6 del total del volumen de la vivienda por hora, durante un examen de presión a 50 Pascales.
- **Diseño libre de puentes térmicos.** Toda esquina o conexión entre componentes debe planearse y ejecutarse cuidadosamente, de manera tal que se eviten los puentes térmicos, o se minimicen lo más posible.

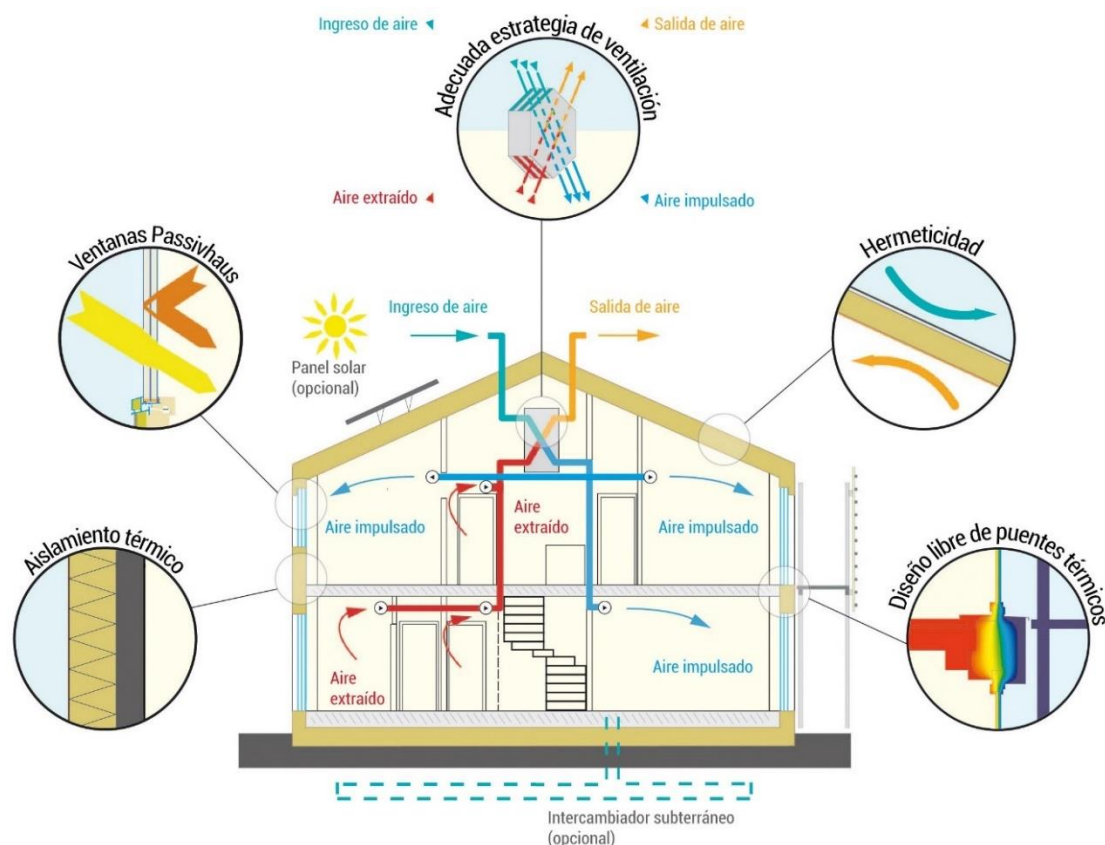


Figura 4. Principios básicos aplicados a la construcción según el estándar Passivhaus. Fuente: Passivhaus Institut.

Cualquier edificio nuevo, sin importar su localización geográfica o sus características funcionales, debe cumplir los siguientes requisitos para ser considerado un edificio Passivhaus y poder obtener la certificación correspondiente:

- La **demanda de energía para calefacción** no debe exceder los 15kWh/m²año (en base a la superficie útil), con un pico de demanda de calefacción máximo de 10W/m².
- La **demanda de energía para refrigeración** no debe exceder los 15kWh/m²año (en base a la superficie útil). Se permiten ciertas concesiones en este requerimiento dependiendo de la zona climática.

- La **demanda de energía primaria renovable** no debe exceder los 60kWh/m²año (en base a la superficie útil).
- La **hermeticidad** al aire debe ser como máximo de 0,6 renovaciones por hora a una presión de 50 Pascales, verificada *in situ* mediante un examen de presión en estado presurizado y despresurizado.
- Debe existir **confort térmico** en todos los espacios habitables tanto en invierno como en verano, con un máximo del 10% de horas al año por encima de los 25°C.

De esta manera, el estándar logra dar una **definición cuantitativa** de lo que es un **edificio de consumo de energía casi nulo**, a diferencia de la Directiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, que daba una **definición cualitativa** de nZEB.

Aplicación del estándar

Passivhaus se basa en la premisa de que es posible proyectar y construir edificios de **muy alta eficiencia energética a costes asequibles**. En efecto, la primera casa pasiva construida en Darmstadt en 1990 implicó un coste superior en un 50% a los costes de una vivienda convencional de ese entonces. Sin embargo, a partir de esa primera experiencia, los costes adicionales implicados en la aplicación del estándar se han reducido 7 veces.²⁷ Varios autores reportan la asequibilidad de viviendas construidas según el estándar Passivhaus en distintos contextos socioeconómicos y climáticos.²⁸ En otro estudio se evaluó la rentabilidad del estándar en el clima mediterráneo español, y se detectó que una vivienda puede ser un edificio Passivhaus a costa de incrementar un 8,65% su presupuesto respecto a una vivienda convencional.²⁹

De igual manera, el estándar Passivhaus exige que los edificios no solo tengan un **consumo de energía casi nulo**, sino que también sean **confortables**. La evaluación del confort en edificios Passivhaus existentes ha dado lugar a diversos resultados: en un estudio se monitoreó una vivienda Passivhaus en el clima subtropical de Chipre, y se detectaron importantes sobrecalentamientos durante el período julio-agosto de 2015;³⁰ en otra investigación se simuló una vivienda Passivhaus en el clima mediterráneo de Portugal y se determinó que la aplicación del estándar reduce considerablemente los

²⁷ Wolfgang Feist, "The world's first Passive House".

²⁸ P. Russo, G. Colaci de Vitis y G. Gentile, "A cost-effective building in the Mediterranean area: Passivhaus design and energy modelling", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 609, no. 7 (2019), <https://doi.org/10.1088/1757-899x/609/7/072024>; Joe Forde et al., "Temporal optimization for affordable and resilient Passivhaus dwellings in the social housing sector", *Applied Energy* 261 (2020), <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114383>; Shane Colclough et al., "Investigation of nZEB social housing built to the Passive House standard", *Energy & Buildings* 179 (2018), <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.06.069>; Aner Martínez Soto et al., "Affordable, Energy-Efficient Housing Design for Chile: Achieving Passivhaus Standard with the Chilean State Housing Subsidy", *Applied Sciences* 10, no. 21 (2020), <https://doi.org/10.3390/app10217390>.

²⁹ H. Saldaña Márquez et al., "The Passivhaus standard in the mediterranean climate: evaluation, comparison and profitability", *Journal of Green Building* 10, no. 4 (2015), <https://doi.org/10.3992/jgb.10.4.55>.

³⁰ Paris Fokaidis et al., "Performance of a Passive House under subtropical climatic conditions", *Energy and Buildings* 133 (2016), <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.09.060>.

riesgos de sobrecalentamiento en verano respecto a una solución convencional;³¹ otros autores analizaron una vivienda multifamiliar en el norte de España, y las encuestas realizadas a sus ocupantes revelaron un porcentaje muy alto de disconfort en época estival.³² Los sobrecalentamientos estivales son un problema reportado en varios estudios realizados en Reino Unido.³³ En tanto otro estudio centrado en el análisis de la calidad de aire en edificios construidos según el estándar Passivhaus indica que en este tipo de edificaciones es posible alcanzar un nivel de calidad ambiental interior adecuado.³⁴

Finalmente, es posible aplicar el estándar en emplazamientos bajo cualquier tipo de **condiciones climáticas**. Si bien existe la percepción de que es un estándar efectivo en el clima de Europa Central,³⁵ región de donde proviene y en donde se desarrollaron las primeras viviendas Passivhaus, un estudio plantea que es posible adaptarlo a distintas condiciones climáticas. Sus autores indican que Passivhaus no impone ninguna restricción explícita relacionada a la forma del edificio o a las propiedades de los componentes, de manera tal que puede adaptarse sin otra limitación más que el cumplimiento de los requerimientos energéticos y de estanqueidad. De esta manera, por ejemplo, en climas templados la transmitancia térmica de la envolvente puede ser mayor que la de un edificio en climas fríos, o en climas cálidos puede prescindirse de un intercambiador de calor, que sí es necesario en climas templados y fríos.³⁶

En cualquier caso, construir un edificio de consumo de energía casi nulo puede resultar todo un reto, ya que las exigencias en materia de aislamiento y hermeticidad traen implícita la adopción de **materiales y tecnologías de alta calidad y eficiencia energética**.³⁷ Por tal motivo, tanto fabricantes como constructores deben ser capaces de adaptar sus prácticas constructivas a este nuevo paradigma.

³¹ António Figueredo et al., "Thermal comfort and energy performance: Sensitivity analysis to apply the Passive House concept to the Portuguese climate", *Building and Environment* 103 (2016), <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.03.031>.

³² Iñigo Rodríguez Vidal, Jorge Otaegi y Xabat Oregi, "Thermal Comfort in NZEB Collective Housing in Northern Spain", *Sustainability* 12, no. 22 (2020), <https://doi.org/10.3390/su12229630>

³³ Seyed Masoud Tabatabaei Sameni et al., "Overheating investigation in UK social housing flats built to the Passivhaus standard", *Building and Environment* 92 (2015), <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.03.030>; Martin Fletcher et al., "An empirical evaluation of temporal overheating in an assisted living Passivhaus dwelling in the UK", *Building and Environment* 121 (2017), <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.05.024>; Rachel Mitchell y Sukumar Natarajan, "Overheating risk in Passivhaus dwellings", *Building Services Engineering Research and Technology* 40, no. 4 (2019), <https://doi.org/10.1177%2F0143624419842006>.

³⁴ Yang Wang et al., "A state of art of review on interactions between energy performance and indoor environment quality in Passive House buildings", *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 72 (2017), <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.10.039>.

³⁵ Shady Attia et al., "Overview and future challenges".

³⁶ Jürgen Schnieders et al., "Design and realisation of the Passive House concept in different climate zones", *Energy Efficiency* 13 (2019), <https://doi.org/10.1007/s12053-019-09819-6>.

³⁷ Véase nota 35.

Certificación conforme al estándar

Como ya se mencionó, cualquier tipo de edificio puede certificarse conforme al estándar Passivhaus. A su vez, puede hacerlo de acuerdo a tres sellos distintos (Figura 5), según se trate de un edificio de consumo de energía casi nulo nuevo (estándar Passivhaus convencional), un edificio de consumo casi nulo renovado (estándar EnerPHit), o un edificio de bajo consumo de energía (estándar PHI Low Energy Building).³⁸ Los dos primeros sellos, a su vez, poseen subcategorías en función del uso o no de energías renovables. A la fecha, más de 33.000 edificios se han certificado, lo que equivale a unos tres millones de metros cuadrados de superficie útil certificada.³⁹



Figura 5. Certificaciones para edificios disponibles dentro del estándar. Fuente: Passivhaus Institut.

Asimismo, el Passivhaus Institut propone sistemas de certificación que van más allá de las propias edificaciones (Figura 6). De esta manera, es posible certificar a aquellos profesionales con experiencia en la concreción de proyectos Passivhaus o a aquellos que concurren a las formaciones y exámenes impartidos por el Passivhaus Institut.⁴⁰ De igual manera, se puede certificar a trabajadores de la industria, en especial a aquellos encargados de la comercialización de productos, que tomen el curso y validen sus conocimientos a través de un examen propuesto por el propio instituto.⁴¹



Figura 6. Certificaciones para profesionales. Fuente: Passivhaus Institut.

³⁸ Passivhaus Institut, "Energy standards: Passive House Classic, Plus and Premium", Passive House, consultado el 25 de mayo de 2022, https://passiv.de/en/03_certification/02_certification_buildings/08_energy_standards/08_energy_standards.html

³⁹ International Passive House Association, "The global Passive House platform", consultado el 25 de mayo de 2022, https://passivehouse-international.org/index.php?page_id=65

⁴⁰ Passivhaus Institut. "Certified Passive House Designers", Passive House, consultado el 25 de mayo de 2022. https://passiv.de/en/03_certification/04_certified-designers/04_certified-designers.htm

⁴¹ Passivhaus Institut, "Certified Passive House Tradesperson", Passive House, 25 de mayo de 2022, https://passiv.de/en/03_certification/05_certified-tradesperson/05_certified-tradesperson.htm

A los efectos del presente trabajo, de especial interés resulta la **certificación de componentes**, que surge ante la necesidad de contar con materiales, productos y sistemas constructivos de alta calidad, que aseguren el cumplimiento de los requerimientos de aislamiento, hermeticidad y ventilación del estándar.⁴² A diferencia de la certificación otorgada a los edificios, que es independiente del clima del emplazamiento, los componentes con certificación Passivhaus la reciben en función de una determinada zona climática (Figura 7), siendo mayor la exigencia de calidad térmica y energética cuanto más frío es el clima.

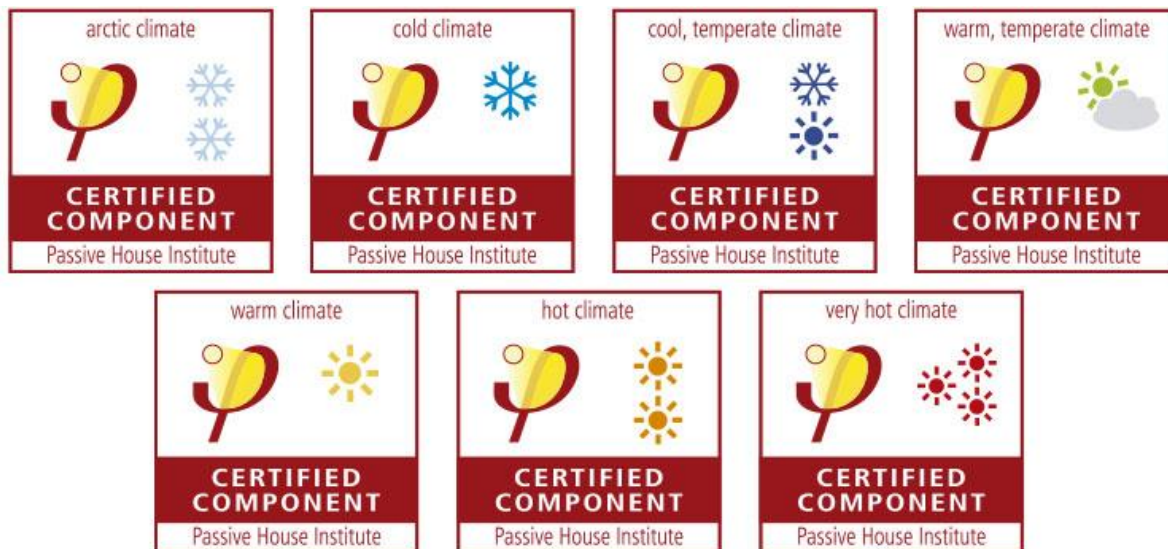


Figura 7. Certificaciones para componentes. Fuente: Passivhaus Institut.

Los componentes certificados pueden utilizarse tanto en edificios a rehabilitar como en edificios nuevos.⁴³ Una vez recibida la certificación, pasan a formar parte de una **base de datos** de acceso público, donde constan su correspondiente certificado y los parámetros higrotérmicos o energéticos considerados.⁴⁴

La base de datos se estructura en **tres categorías**, como indica la Figura 8. Dentro de la categoría de componentes para **envolvente opaca** se encuentra la subcategoría de **sistemas constructivos**, en la cual es posible encontrar soluciones de muro, cubierta, soluciones combinadas para muro y cubierta, y componentes para aislamiento.

⁴² Passivhaus Institut, "Benefits of component certification", Passive House, consultado el 26 de mayo de 2022, https://passiv.de/en/03_certification/01_certification_components/01_benefits-of-certification/01_benefits-of-certification.htm

⁴³ Zeno Bastian et al., "Retrofit with Passive House components", *Energy Efficiency* 15, no. 1 (2022), <https://doi.org/10.1007/s12053-021-10008-7>

⁴⁴ Passivhaus Institut, "Component Database", Passive House, consultado el 26 de mayo de 2022, <https://database.passivehouse.com/en/components/>

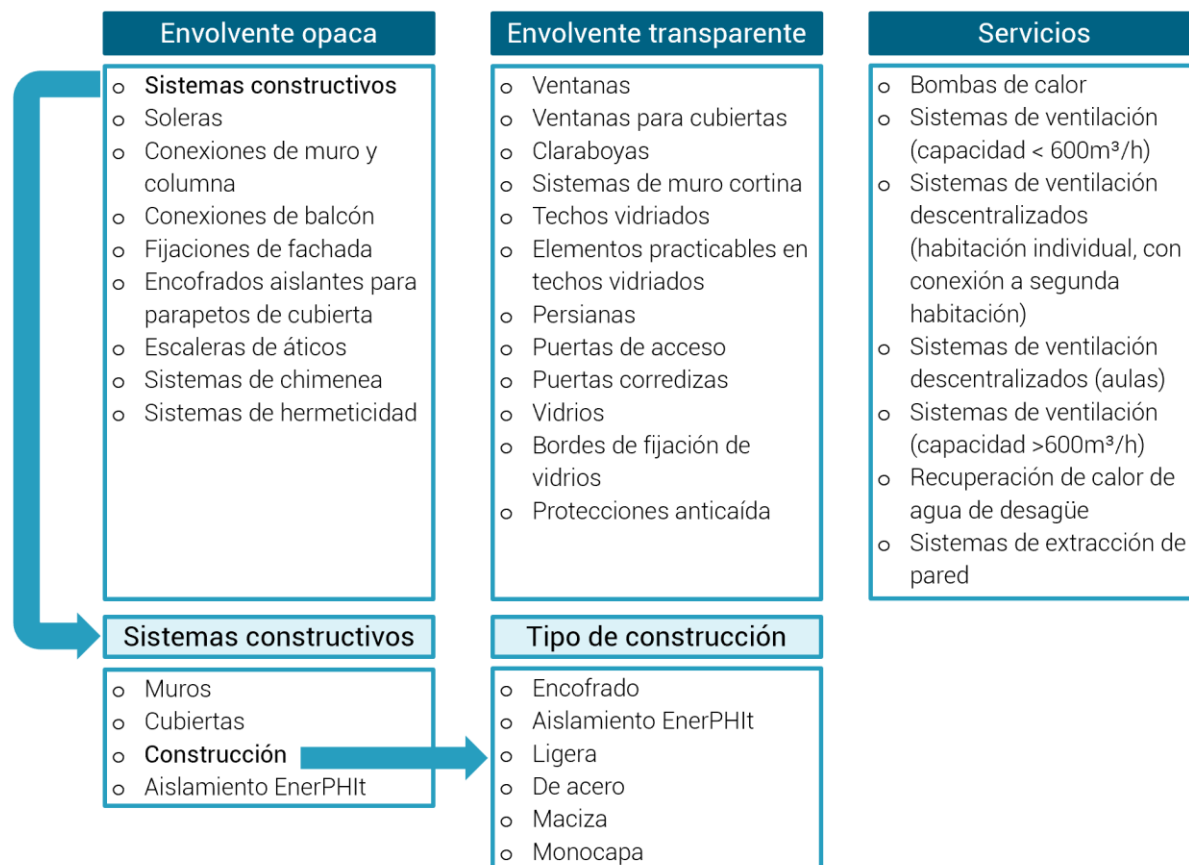


Figura 8. Estructura de la base de datos de componentes certificados Passivhaus. Fuente: elaboración propia en base a información del Passivhaus Institut.

A mayo de 2022, es posible encontrar 79 componentes certificados dentro de la subcategoría de sistemas constructivos, de los cuales 52 se corresponden con el subtipo **construcción**, esto es, componentes que pueden utilizarse indistintamente en muros y cubiertas. Asimismo, de los 79 sistemas constructivos certificados, 8 proceden de España y fueron certificados en todos los casos para clima cálido templado (Tabla 1). Entre ellos existen solo dos sistemas constructivos utilizables tanto en muros como en cubiertas, ambos de tipo de construcción ligera de madera. Además, existen tres sistemas constructivos de acero producidos en España, todos ellos utilizados para la resolución de muros, y tres sistemas constructivos a base de componentes macizos. Esto significa que no existe en la actualidad un sistema constructivo modular ligero metálico para muros y cubiertas producido en España que haya recibido certificación Passivhaus.

Nombre del componente	Fabricante	Categoría	Tipo de construcción	Zona climática
1 Thermohip HOUSING SATE-COAT	Thermohip SLU	Construcción	Ligera (madera)	Cálido templado
2 Thermohip HOUSING SATE-WALL	Thermohip SLU	Construcción	Ligera (madera)	Cálido templado
3 Insupanel	Construcciones Juan Zorzano Blanco S. L.	Muro	Maciza (prefabricada)	Cálido templado
4 TECTUM FIRST	BMI Roofing Systems	Cubierta	Maciza	Cálido templado
5 ARCTIC WALL	Hormipresa Nec SI	Muro	Maciza (prefabricada)	Cálido templado
6 BLUEFACE	Joaquin Hernandez Garcia SL	Muro	Acero	Cálido templado
7 BLUEFACE ST	Joaquin Hernandez Garcia SL	Muro	Acero	Cálido templado
8 Passivhaus External Wall System	Knauf Insulation S. L.	Muro	Acero	Cálido templado

Tabla 1. Componentes certificados producidos en España. Fuente: Passivhaus Institut.

2.3. El sistema constructivo

Origen y características generales

La empresa Proyectopía S.L. desarrolló el sistema constructivo en el seno del proyecto empresarial "Sistema optimizado de producción de viviendas ecoeficientes. Proyectopía e-home", financiado por el Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial (CDTI) mediante la convocatoria 2015 del Programa Neotec, en el ámbito del Programa Estatal de Liderazgo Empresarial en I+D+I y del Plan Estatal de Investigación Científica y Técnica y de Innovación 2013-2016. El proyecto se llevó a cabo entre los años 2015 y 2017 en Galicia, España, con el objetivo de desarrollar un sistema apto para la construcción de **viviendas aisladas de bajo costo y bajo consumo energético**.⁴⁵

En el año 2017, se solicitó la patente del sistema en España, con el título "Estructura modular para la construcción de edificaciones". Tal y como se describe en la correspondiente patente, se trata de una estructura modular para la construcción de edificaciones (Figura 9) que comprende unos paneles metálicos que se unen entre sí por pares de laterales adyacentes mediante unos sistemas de unión, donde dicha estructura modular integra la función **portante** y de **revestimiento** de la vivienda, **captación y redistribución térmica**.⁴⁶

⁴⁵ Patricia Linhares, Víctor Hermo y Carolina Meire, "Environmental design guidelines for residential NZEBs with liner tray construction", *Journal of Building Engineering* 42 (2021), <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.102580>

⁴⁶ Víctor Hermo Sánchez, *Estructura modular para la construcción de edificaciones*, Patente española ES2716889, presentada el 15 de diciembre de 2017 y publicada el 29 de enero de 2020, https://consultas2.oepm.es/pdf/ES/0000/000/02/71/68/ES-2716889_B2.pdf

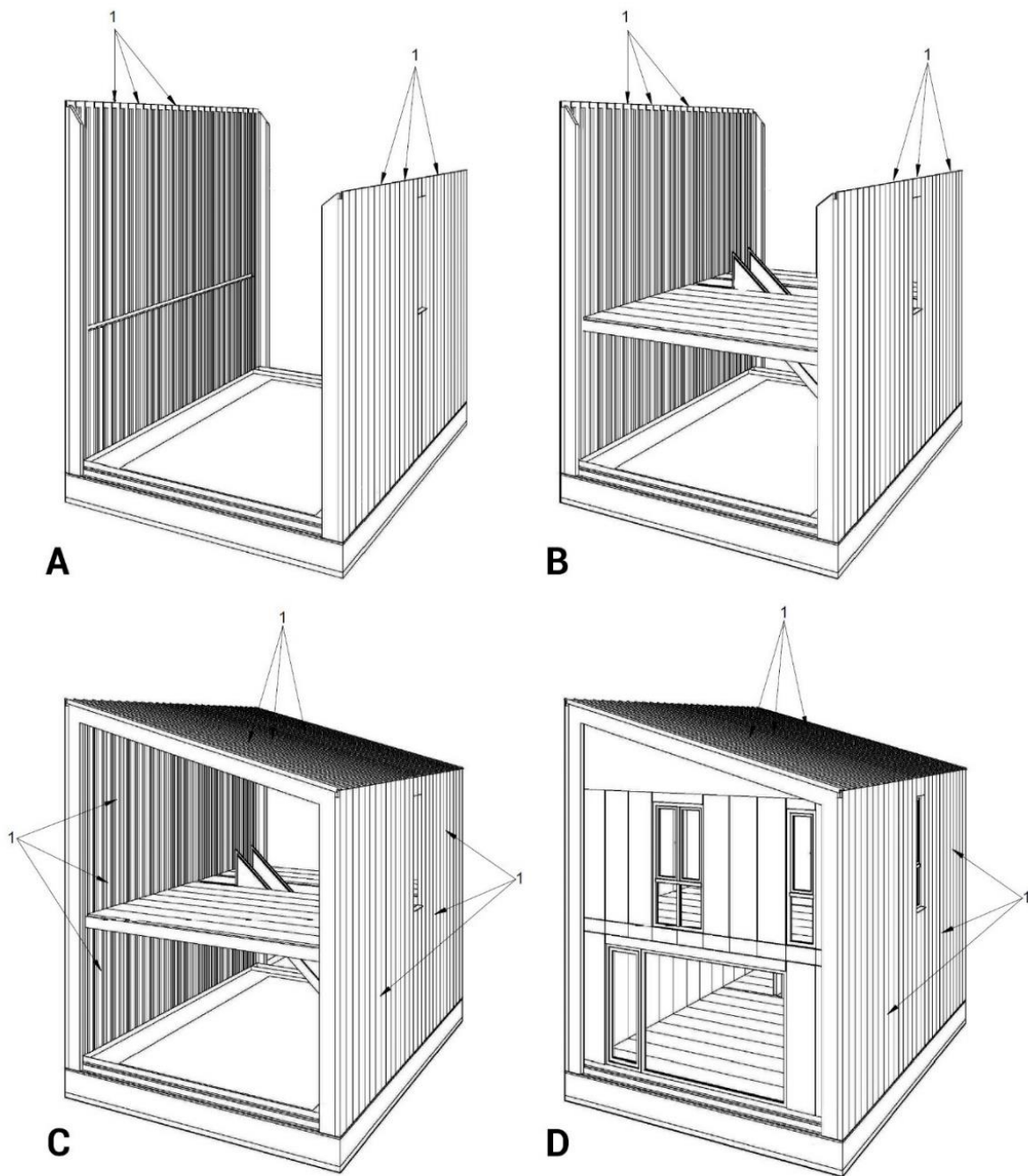


Figura 9. Proceso constructivo de una edificación aplicando el sistema constructivo modular de aluminio extrusionado. Fuente: Patente Española N°ES2716889.

El sistema pertenece al grupo de los **sistemas constructivos modulares**. En ellos, la mayoría de los trabajos se realizan en fábrica, lo que presenta múltiples ventajas: contar con un proceso constructivo más rápido y seguro, mayor precisión en la estimación de los tiempos de ejecución de la obra, calidad superior, menor cantidad de operarios en obra, menor generación de desperdicios y una reducción en el impacto ambiental.⁴⁷

Dentro de los sistemas constructivos modulares, encontramos los **sistemas estructurales ligeros metálicos**, que varían desde los entramados ensamblados *in situ* hasta los módulos tridimensionales conformados en fábrica. Un término medio entre estas opciones son los **sistemas de paneles**. En este caso, se producen paneles de muros y cubiertas en fábrica, y luego se ensamblan en obra.⁴⁸ Dentro de esta categoría se encuentran los **revestimientos de paneles o paneles tipo cassette**, de sección C y generalmente fabricados en acero conformado en frío. Esta solución ha sido objeto de numerosos estudios⁴⁹ que reportan ventajas estructurales, una buena resistencia antisísmica, un aumento en la productividad y la posibilidad de utilizar los paneles en posición vertical como muros portantes en construcciones de poca altura.

El sistema constructivo en estudio pertenece al grupo de sistemas de paneles tipo *cassette*. En este caso, los componentes son fabricados en **aluminio extrusionado**, lo que suma a las ventajas antes mencionadas, la ligereza propia del material. Otra cualidad de los sistemas de paneles tipo *cassette* es la posibilidad de utilizar la envolvente metálica como superficie de captación de la radiación solar, que puede servir para producir agua caliente para uso sanitario o calefacción. Es de esta manera que el sistema puede cumplir la triple función de servir como estructura, como envolvente del edificio y como sistema de captación solar térmica. La conformación de la envolvente finaliza con la colocación de capas de aislamiento y tableros de OSB tras los paneles, que junto al acabado interior forman un muro tecnológico con capacidades aislantes. Por otra parte, las fachadas no portantes alojan las superficies acristaladas y superficies opacas con distintas posibilidades de acabado.⁵⁰

⁴⁷ Wahid Ferdous et al., "New advancements, challenges and opportunities of multi-storey modular buildings – A state-of-the-art review", *Engineering Structure* 183 (2019), <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.01.061>

⁴⁸ N. Soares et al., "Energy efficiency and thermal performance of lightweight steel-framed (LSF) construction: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 78 (2017), <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.066>

⁴⁹ J. Michael Davies, "Light gauge steel cassette wall construction – theory and practice", *Journal of Constructional Steel Research* 62, no. 11 (2006) <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2006.06.028>; Juan Pérez Valcárcel, Víctor Hermo y José Rodríguez Cheda, "A new building system: Structural aspects of COTaCERO system", *Structures and Architecture* 1 (2013), <https://doi.org/10.1201/b15267>; Mircea Georgescu et al. "Building Cladding using Liner Trays: Experimental and Numerical Approach", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 603, no. 2 (2019), <https://doi.org/10.1088/1757-899X/603/2/022051>; Mohammed Fathi Belal et al., "Numerical Study of Seismic Behavior of Light-Gauge Cold-Formed Steel Stud Walls", *Journal of Constructional Steel Research* 174 (2020), <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.106307>

⁵⁰ Proyectopía S.L., "Proyectopía: Memoria de calidades", Idealista, consultado el 26 de mayo de 2022, <https://www.idealista.com/documents/public/166801849>



Figura 10. Izquierda, aplicación del sistema en una obra en construcción. Derecha, arriba, detalle de la unión de dos paneles aluminio; abajo, circuito para captación solar en paneles de aluminio. Fuente: Proyectopía S.L.

Los precursores del sistema modular de aluminio extrusionado son el sistema constructivo industrializado *in situ* Cotacero⁵¹ (Figura 11) y el sistema Reverstop⁵² (Figura 12), cuyos estudios técnicos y estructurales fueron determinantes para demostrar la resistencia y estabilidad de los paneles portantes de aluminio extrusionado.

⁵¹ Víctor Manuel Hermo Sánchez, "Sistema constructivo industrializado in situ COTaCERO: transferencia tecnológica: construcción de depósitos-ejecución de viviendas en altura mediante paneles portantes de acero", (Tesis doctoral, Universidad de A Coruña, 2011), <http://hdl.handle.net/2183/10028>

⁵² Juan Pérez Valcárcel, Manuel Muñoz Vidal y Víctor Hermo, "Construcción izada: Condicionantes estructurales del sistema REVERSTOP", *Informes de la Construcción* 72, no. 559 (2020), <https://doi.org/10.3989/ic.72993>

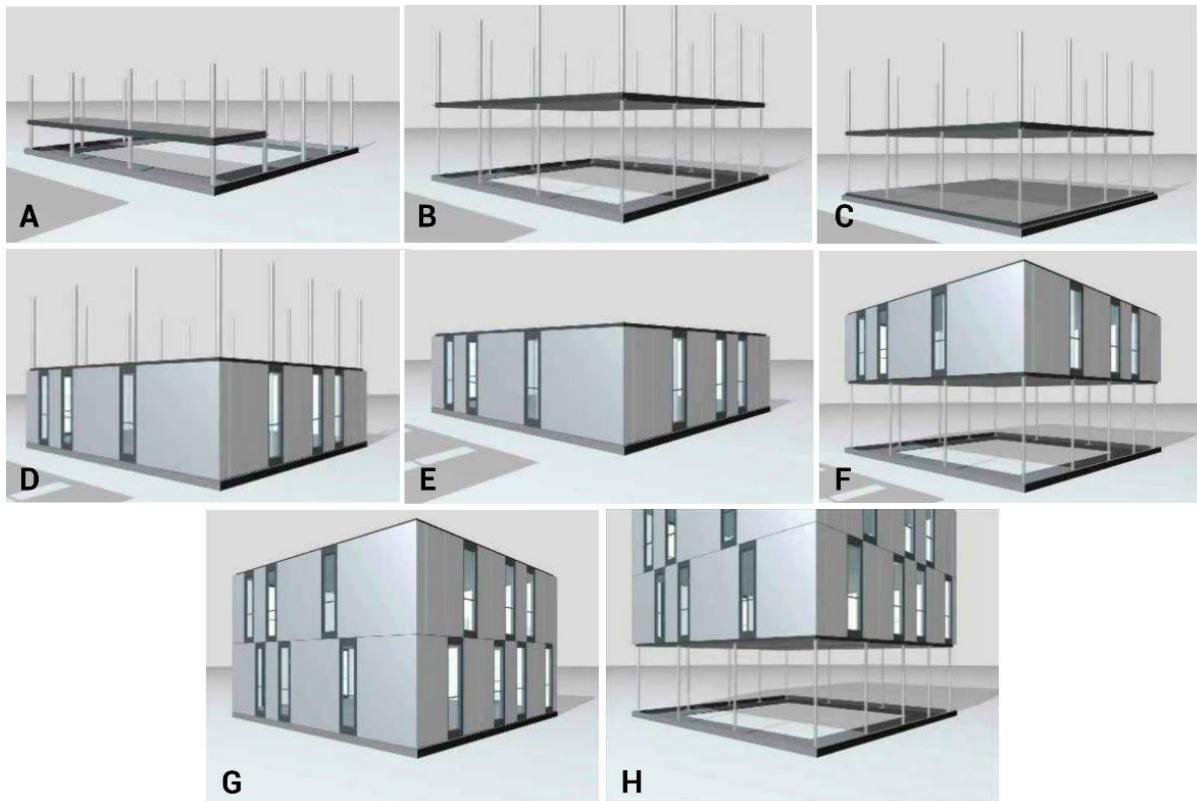


Figura 11. Proceso constructivo de una edificación aplicando el sistema Cotacero. Fuente: Víctor Hermo Sánchez.

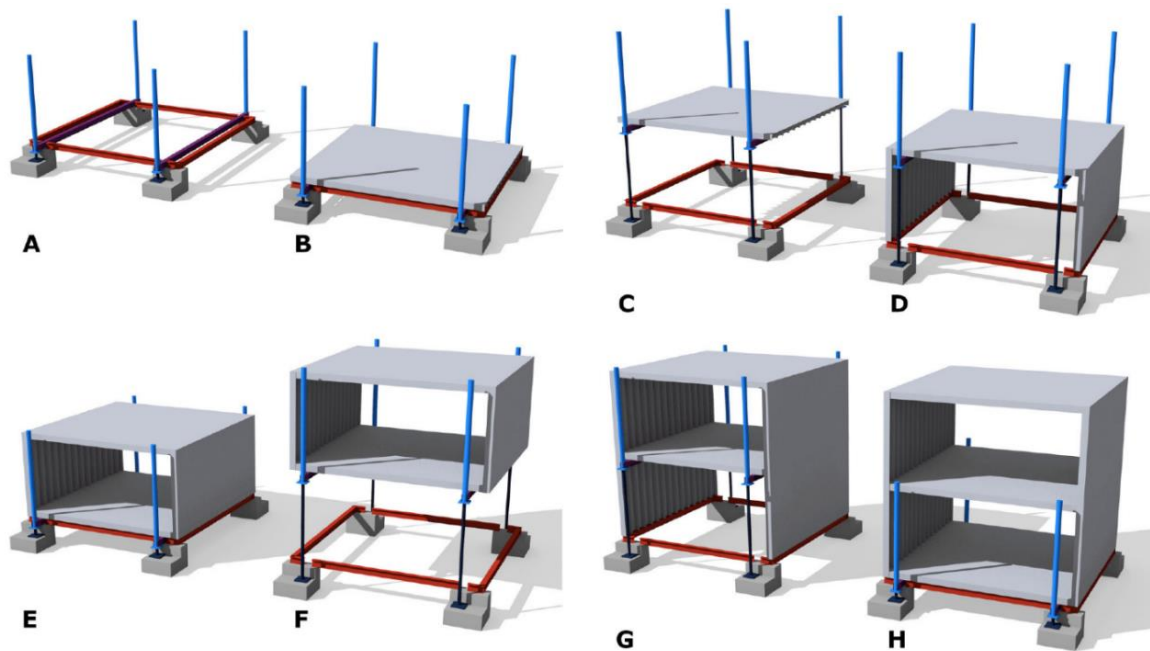


Figura 12. Proceso constructivo de una edificación aplicando el sistema Reverstop. Fuente: Juan Pérez Valcárcel et al.

Aplicación del sistema en viviendas de consumo de energía casi nulo

El sistema fue concebido para utilizarse en la construcción de viviendas aisladas de baja altura, a bajo costo y con bajo consumo energético. Si bien la naturaleza modular, ligera y metálica de los perfiles que conforman los muros y cubiertas permite asegurar el cumplimiento de las dos primeras premisas, esta misma naturaleza implica disponer de una envolvente de baja inercia térmica y alta conductividad térmica, que pueden afectar el confort de los espacios interiores. Por tal motivo, para evaluar la compatibilidad del sistema con los principios de los **edificios de consumo de energía casi nulo**, se llevó a cabo un estudio sobre un prototipo de vivienda de dos niveles definido dentro del proyecto empresarial del que surgió el sistema constructivo.⁵³

En primera instancia, se sometió el prototipo al proceso de certificación indicado en el Documento Básico de Ahorro de Energía del Código Técnico de la Edificación de España, regulación española que traspone la EPBD. Mediante ese estudio, se detectó un consumo de energía para calefacción de 27,84kWh/m²año y de 20,65kWh/m²año para refrigeración. Asimismo, se realizaron simulaciones para reconocer en detalle el nivel de confort interior y el perfil energético del prototipo. En este análisis, los niveles de consumo resultaron mayores y se detectaron períodos de sobrecalentamiento tanto en invierno como en verano.

Con estos resultados, los autores procedieron a ajustar los distintos parámetros que intervienen en el comportamiento energético del prototipo (espesor del aislamiento, tipo de acristalamiento, protección solar, etcétera) de forma tal de establecer una serie de directrices a seguir para que cualquier edificio construido con el sistema pueda adaptarse a distintos contextos climáticos y mantener las condiciones de confort interior y los consumos energéticos en niveles óptimos. Tras analizar el prototipo mejorado, este presentó valores de demanda de energía para calefacción y de demanda de energía para refrigeración por debajo de los 15kWh/m²año en ciudades de climas tan disímiles como Pontevedra, Madrid, Sevilla y Berlín. En todos los casos, los valores de demanda de energía se ajustaron a las exigencias del estándar Passivhaus.

De esta manera, se pudo comprobar la factibilidad de aplicación del sistema en la edificación de viviendas de consumo de energía casi nulo compatibles con el **estándar Passivhaus**, en tanto se tengan en cuenta criterios de diseño ambiental adecuados y compatibles con los principios de **asequibilidad** y **confortabilidad**.

⁵³ Patricia Linhares, Víctor Hermo y Carolina Meire, "Environmental design guidelines".

El sistema constructivo en la actualidad

En la actualidad, el sistema se utiliza en la construcción de viviendas en el noroeste de España. A su vez, existe un complejo de cinco apartamentos turísticos llamado Mardesía, construido en 2018 y ubicado muy próximo a la playa de A Lanzada, en la provincia de Pontevedra, Galicia, que funciona como prototipo visitable. En estos edificios, se ensayaron distintas disposiciones de los paneles estructurales de aluminio extrusionado en la cubierta, como se observa en la Figura 13.



Figura 13. Apartamentos turísticos construidos con el sistema constructivo modular de aluminio extrusionado. Fuente: fotografía propia.

Los estudios realizados para verificar la aplicabilidad del sistema constructivo modular ligero en la edificación de nZEB indicaron que es posible utilizarlo en la construcción de viviendas de consumo de energía casi nulo según los requerimientos del estándar Passivhaus. Asimismo, dadas sus características tecnológicas, el sistema constructivo es susceptible de recibir la certificación Passivhaus en la categoría "envolvente opaca", subcategoría "sistemas constructivos", subtipo "construcción".

3. Justificación

Reconocido el contexto energético, legal, normativo y técnico en torno al problema planteado, resulta pertinente estudiarlo en el presente trabajo por las siguientes razones:

- A fin de cumplir con los compromisos ambientales asumidos por todos los países en el Acuerdo de París, y considerando que la edificación es responsable del 37% de consumo de energía final y del 36% de las emisiones de dióxido de carbono a nivel mundial, resulta necesario promover la eficiencia energética de las nuevas edificaciones mediante la mejora de las prestaciones energéticas de los materiales, elementos y sistemas que las constituyen.
- Tanto a nivel europeo como español, se exige que los edificios nuevos que se construyan sean de consumo de energía casi nulo. Por lo tanto, es menester evaluar el comportamiento higrotérmico de los nuevos componentes constructivos que salen al mercado para que puedan adaptarse a las exigencias impuestas a los edificios nuevos.
- Passivhaus es un estándar de construcción que ha experimentado una continua expansión y aceptación en el mercado europeo. Por tal motivo, responder a sus requerimientos resulta necesario para responder, a su vez, ante un mercado que exige materiales y sistemas de altas prestaciones energéticas.
- No existen en la actualidad sistemas constructivos ligeros, metálicos, aplicables a muros y cubiertas, y desarrollados en España que hayan recibido la certificación Passivhaus para clima cálido temprano. Por lo tanto, llevar a cabo este trabajo se constituye como el primer paso para lograr que un sistema constructivo modular de aluminio extrusionado se convierta en el primer sistema de esas características en certificarse conforme a ese estándar.
- El sistema constructivo es de reciente creación, y como tal, su desempeño energético y sus posibilidades de mejora en ese ámbito aún están en fase de estudio. Por tal razón, a efectos de evaluar cuantitativamente su comportamiento energético, resulta necesario estudiarlo tomando como referencia un estándar ya validado tanto por la comunidad científica como por el mercado.

4. Objetivos

Por lo expuesto en los apartados anteriores, los objetivos del presente trabajo son los siguientes:

Objetivo general

Evaluar el comportamiento higrotérmico de un sistema constructivo modular de aluminio extrusionado según los requerimientos del estándar Passivhaus para componentes.

Objetivos específicos

- I. Analizar los requerimientos de higiene, confort, eficiencia y humedad exigidos en el estándar Passivhaus para componentes en clima cálido templado.
- II. Estudiar las soluciones adoptadas en el sistema constructivo modular de aluminio extrusionado mediante la simulación de su comportamiento higrotérmico en forma estacionaria.
- III. Comparar los resultados de la simulación del sistema constructivo actual con los requerimientos del estándar Passivhaus para componentes, indicados para clima cálido templado.
- IV. Reconocer mediante simulaciones el comportamiento higrotérmico del sistema constructivo modular de aluminio extrusionado aplicando soluciones constructivas que optimicen su desempeño.
- V. Comparar los resultados de la simulación del sistema constructivo modificado con los requerimientos del estándar Passivhaus para componentes, indicados para clima cálido templado.
- VI. Contribuir con el proceso de certificación del sistema constructivo modular de aluminio extrusionado ante el Passivhaus Institut.

5. Metodología

El trabajo se estructura en tres etapas:

- **Análisis:** incluye una revisión bibliográfica tanto de los fundamentos teóricos en los que se basa el estándar Passivhaus para componentes, como en los procedimientos y requerimientos propios del estándar. Además, se analiza el sistema constructivo recurriendo no solo a una revisión bibliográfica, sino también a la interpretación de planos y recopilación de información provista por la empresa que lo desarrolló.
- **Simulación, comparación, modificación:** se somete el sistema constructivo a una simulación de su comportamiento higrotérmico mediante un software apropiado, de manera tal de poder comparar su comportamiento ante el estándar Passivhaus correspondiente. A partir de esta comparación, se detectan los requerimientos no cumplidos y se procede a modificar las soluciones constructivas del sistema para que este pueda satisfacer los requisitos. A continuación, se somete el sistema modificado a una nueva simulación y comparación. El proceso se realiza de forma iterativa.
- **Discusión de resultados y conclusiones:** de los resultados obtenidos en la etapa anterior se detectan las limitaciones y posibles líneas de investigación futuras, como así también las posibilidades de implementar las modificaciones y de presentarlo ante el Passivhaus Institut para su certificación.

La Figura 14 representa estas tres etapas de manera simplificada, mientras que la Figura 15 esquematiza la totalidad de la metodología aplicada, incluyendo los recursos que se utilizan en el desarrollo de cada etapa.

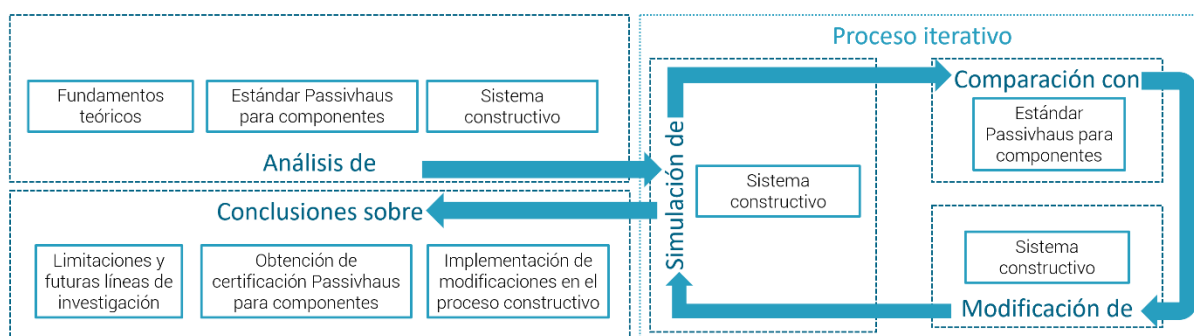


Figura 14. Representación simplificada de la metodología aplicada en la realización de este trabajo.

Fuente: elaboración propia.

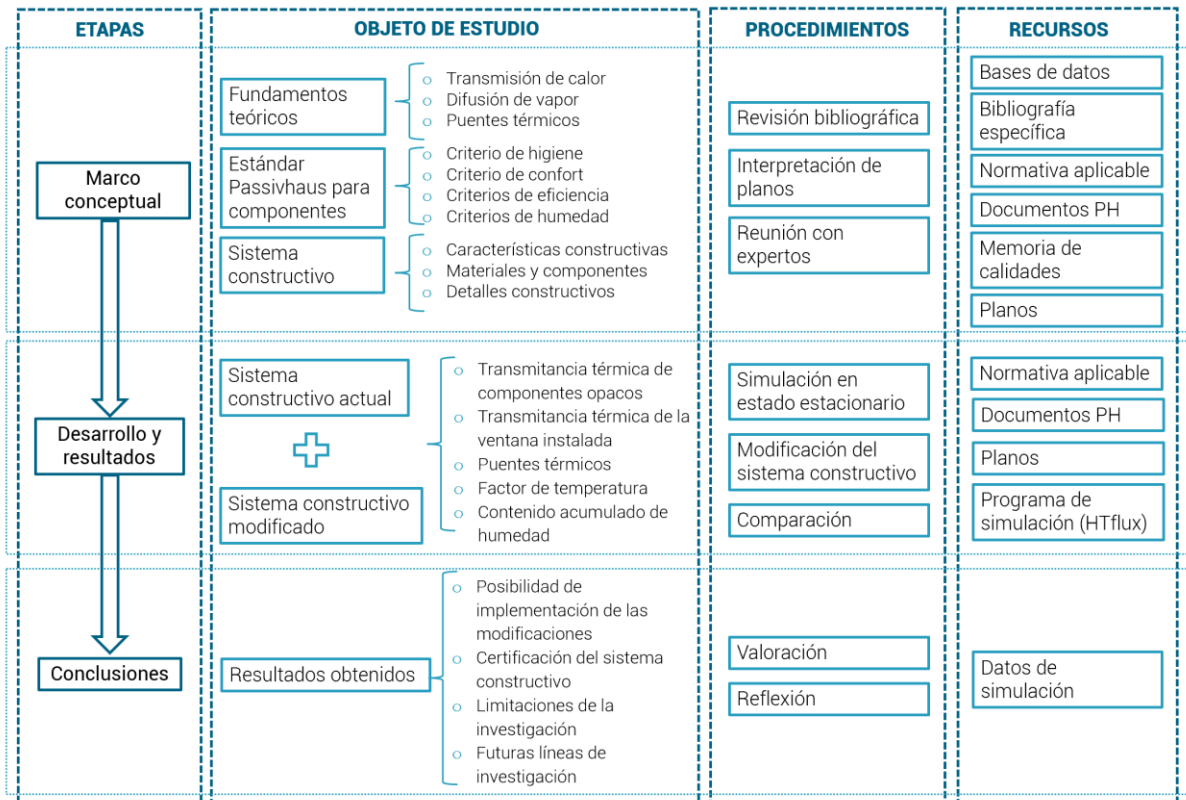


Figura 15. Estructura desagregada de la metodología aplicada en la realización de este trabajo. Fuente: elaboración propia.

Parte II

Marco conceptual

6. Fundamentos teóricos
7. El estándar Passivhaus para componentes
8. El sistema constructivo modular de aluminio extrusionado



6. Fundamentos teóricos

A efectos de comprender los fenómenos físicos que ocurren en los edificios y que el estándar Passivhaus tiene en consideración al momento de certificar componentes constructivos, en este capítulo se abordan algunos de los conceptos elementales en torno a los fenómenos de **transmisión de calor** y **difusión de vapor** de agua. Esta revisión también resulta útil para poder hacer una correcta interpretación de los resultados arrojados por la simulación del sistema constructivo. Asimismo, en este apartado se profundiza en el fenómeno de los **puentes térmicos**, de particular relevancia para esta investigación.

6.1. Transmisión de calor

Formas de transmisión del calor

El **calor** es la energía interna que se transfiere de un cuerpo a otro debido a una diferencia de temperatura, transferencia que en la naturaleza ocurre siempre desde el cuerpo de mayor temperatura (cuerpo caliente) hasta el cuerpo de menor temperatura (cuerpo frío). Transmitir calor a un cuerpo puede significar un aumento de su temperatura o un cambio en la condición física de su sustancia, fenómeno conocido como cambio de fase.¹ De estas dos posibilidades se desprenden los conceptos de calor sensible y calor latente, entendido el primero como la energía calorífica suministrada a un cuerpo y que hace que aumente su temperatura, y el segundo como la energía calorífica suministrada a un cuerpo que hace que se produzca un cambio de fase en su sustancia, por ejemplo, el paso del estado líquido al estado gaseoso.

La **cantidad de calor** que se transmite a un cuerpo o que cede un cuerpo a otro queda definida por la siguiente ecuación:

$$Q = m \times C_e \times \Delta T$$

Donde:

Q = calor absorbido o cedido [J]

m = masa del cuerpo [kg]

C_e = calor específico de la sustancia [J/kgK]

ΔT = diferencia de temperatura [K]

Ahora bien, la transmisión de calor puede ocurrir por tres mecanismos distintos:²

¹ Begoña Blasco Laffón et al., *Fundamentos físicos de la edificación II*, (Madrid: Delta Publicaciones, 2008).

² Carlos Castro Martín, *Aislamiento térmico en edificación*, (Madrid: Fundación Escuela de la Edificación, 2008).

- **Por conducción.** Ocurre en el medio material, entre dos cuerpos en contacto o entre dos partes de un mismo cuerpo, por contacto molécula a molécula, sin desplazamiento de estas. Esta forma de transmisión queda definida por la **Ley de Fourier**, expresada en la siguiente ecuación:³

$$q = -\lambda \times dT/dx$$

Donde:

q = flujo de calor por unidad de tiempo y superficie [W/m²]

λ = coeficiente de conductividad térmica del material [W/mK]. Posee signo negativo porque el sentido del flujo es contrario al gradiente de temperatura

dT/dx = gradiente de temperatura [K]

Para la transmisión de calor unidimensional (dentro de un material homogéneo entre dos capas isotermas infinitas y paralelas), se puede expresar con la siguiente ecuación simplificada:

$$q = \lambda/e \times \Delta T$$

Donde:

λ = coeficiente de conductividad térmica del material [W/mK]

e = espesor del material [m]

ΔT = diferencia de temperatura [K]

- **Por convección.** Ocurre entre una superficie y un fluido en contacto a distinta temperatura, cuyas moléculas se encuentran en movimiento. Esta forma de transmisión queda definida por la **Ley de Newton**, expresada en la siguiente ecuación:⁴

$$q = Q/t = h \times S \times \Delta T$$

Donde:

q = Q/t = flujo calorífico por unidad de tiempo [W]

h = coeficiente de convección [W/m²K]. Coeficiente de transmisión de calor del fluido al cuerpo o del cuerpo al fluido. Varía en función de distintas características del fluido, como su velocidad, viscosidad, etcétera.

S = superficie perpendicular al flujo térmico [m²]

ΔT = diferencia de temperatura [K]

³ Carlos Castro Martín, *Aislamiento térmico en edificación*.

⁴ Begoña Blasco Laffón et al., *Fundamentos físicos*.

- **Por radiación.** Ocurre sin medio material, se propaga en línea recta entre dos cuerpos colocados uno frente a otro, y al incidir sobre una superficie, una parte de la energía calorífica se refleja y otra atraviesa el cuerpo, atenuada por los medios que debe atravesar. Esta forma de transmisión queda definida por la Ley de Stefan-Boltzmann, expresada en la siguiente ecuación:⁵

$$q = Q/t = \sigma \times \varepsilon \times S \times T^4$$

$q = Q/t$ = flujo calorífico por unidad de tiempo [W]

σ = constante de Stefan-Boltzmann [$5,6687 \times 10^{-8} \text{W/m}^2\text{K}^4$]

ε = poder emisivo del material [adimensional]

T = temperatura absoluta del cuerpo emisor [K]

Las tres formas de transmisión de calor se esquematizan en la Figura 16.

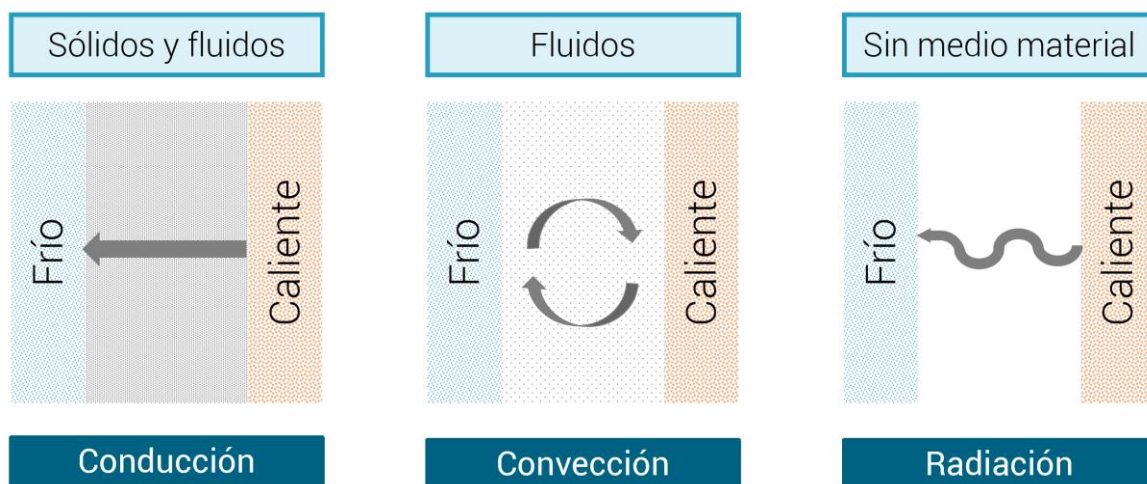


Figura 16. Mecanismos de transmisión de calor. Fuente: Carlos Castro Martín.

Resistencia térmica

La **resistencia térmica R** es la oposición que presenta un cuerpo al paso del flujo de calor, por tanto, es inversamente proporcional a este.⁶ Cuando la transmisión de calor es unidimensional, se define mediante la siguiente ecuación:

$$R = e / \lambda$$

Donde:

R = resistencia térmica [$\text{m}^2\text{K/W}$]

e = espesor del material [m]

λ = coeficiente de conductividad térmica del material [W/mK]

⁵ Begoña Blasco Laffón et al., *Fundamentos físicos*.

⁶ Véase nota 5.

Reemplazando términos en la ecuación simplificada de Fourier, se verifica la proporción inversa entre flujo de calor y resistencia térmica:

$$q = \Delta T/R$$

Donde:

R = resistencia térmica [m^2K/W]

q = flujo de calor por unidad de tiempo y superficie [W/m^2]

ΔT = diferencia de temperatura [K]

En componentes multicapas, como es el caso de los cerramientos de los edificios, la **resistencia térmica total** R_T es la sumatoria de las resistencias térmicas de cada capa, un comportamiento análogo al de las resistencias eléctricas en serie en un circuito eléctrico.

Dado que en los cerramientos existe transmisión de calor por convección desde el aire del ambiente a las capas superficiales tanto en el interior como en el exterior, existen **resistencias térmicas superficiales** que forman parte de la resistencia térmica total.⁷ La resistencia térmica de las capas superficiales es la inversa del coeficiente de convección presente en la Ley de Newton:

$$R_T = 1/h_i + e_1/\lambda_1 + e_2/\lambda_2 + \dots + e_n/\lambda_n + 1/h_e$$

$$R_T = R_{si} + R_1 + R_2 + R_n + R_{se}$$

La **transmitancia térmica** U , por otro lado, es la inversa de la resistencia térmica total. Revela la capacidad de transmisión de calor desde el aire situado en el interior de la edificación hasta el exterior (en situación de invierno). Reemplazando términos en la ecuación simplificada de Fourier, se verifica la proporción directa entre flujo de calor y transmitancia térmica:

$$U = 1/R \qquad q = U \times \Delta T$$

Donde:

U = transmitancia térmica [W/m^2K]

R = resistencia térmica [m^2K/W]

q = flujo de calor por unidad de tiempo y superficie [W/m^2]

ΔT = diferencia de temperatura [K]

⁷ Begoña Blasco Laffón et al., *Fundamentos físicos*.

Materiales aislantes térmicos

Conociendo el coeficiente de conductividad térmica λ de un material y su espesor, es posible determinar su resistencia y transmitancia térmica cuando se lo utiliza en la conformación de la envolvente de un edificio. La conductividad térmica es la principal propiedad que caracteriza el comportamiento térmico de los materiales.

Una primera consideración a tener en cuenta en el estudio de la conductividad térmica de los materiales, es que el **aire** posee una conductividad térmica menor que los materiales masivos. Por tal razón, los materiales ligeros (que poseen poros llenos de aire en su composición) tienen una conductividad térmica baja, mientras que los materiales pesados (más densos) poseen una conductividad térmica alta.⁸

Una segunda consideración a tener en cuenta es la influencia del **agua** en dicho comportamiento térmico. El agua conduce el calor veinticinco veces más que el aire. Por lo tanto, si los poros de un material ligero se llenan de agua, el material en cuestión pierde su cualidad de aislante térmico.⁹

La Tabla 2 clasifica someramente los materiales de construcción en función de su conductividad térmica:

Grupo	λ (W/mK)	Materiales
Metales	Muy elevada	Cobre, aluminio, acero...
Materiales de construcción pesados	0,5-3	Piedra, hormigón, fábrica de ladrillo
Materiales de construcción ligeros	0,1-0,5	Hormigón celular, maderas, plásticos
Materiales aislantes	0,025-0,065	Corcho, vidrio celular, lanas minerales, espumas plásticas

Tabla 2. Valores promedio de conductividad térmica de materiales de construcción. Fuente: elaboración propia en base a Carlos Castro Martín.

Los materiales de menor conductividad térmica son considerados **aislantes térmicos** y, en base a la ecuación de la resistencia térmica ya enunciada, precisan de menor espesor que otros materiales para oponer la misma resistencia a la transmisión de calor. Esto los convierte en materiales de construcción imprescindibles en la conformación de la envolvente de los edificios si se pretende limitar la transmisión de calor del interior al exterior en invierno y del exterior al interior en verano. Su efecto en el gradiente de temperaturas de un componente (Figura 17) es tal que divide al componente en dos partes, una caliente y otra fría. Esto se debe a que el salto de temperatura en una capa es proporcional a la resistencia térmica de esa capa: a mayor resistencia térmica, mayor salto de temperatura. Este aspecto resulta particularmente relevante en el estudio del fenómeno de condensación intersticial.

⁸ Carlos Castro Martín, *Aislamiento térmico en edificación*.

⁹ Véase nota 8.

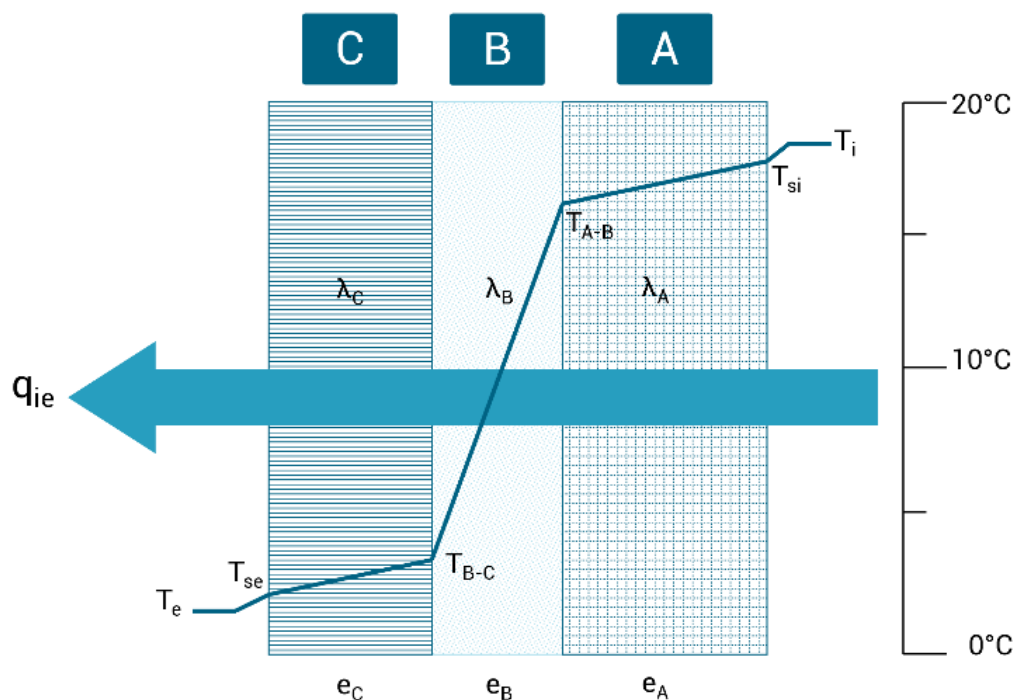


Figura 17. Diagrama de temperaturas de un cerramiento multicapa. Fuente: Carlos Castro Martín.

Al observar el diagrama de la Figura 17, se evidencia que la temperatura en la superficie interior del cerramiento (T_{si}) difiere de la temperatura interior (T_i). Este descenso de la temperatura es producto de la resistencia superficial interior antes mencionada. La temperatura superficial interior se obtiene a partir de la siguiente ecuación:¹⁰

$$T_{si} = T_i - U/h \times (T_i - T_e)$$

Donde:

T_{si} = temperatura superficial interior (°C)

U = transmitancia térmica del cerramiento (W/m^2K)

h = coeficiente de convección [W/m^2K]

T_i = temperatura ambiente interior [°C]

T_e = temperatura ambiente exterior [°C]

Transmisión de calor en los edificios

En una edificación, la transmisión de calor se traduce en **pérdidas** (calor que el edificio cede al ambiente exterior a través de su envolvente) y **ganancias** (calor que se transmite desde el exterior hacia el interior del edificio a través de la envolvente). En una mayoría de casos, las pérdidas y ganancias caloríficas de un edificio se producen fundamentalmente por conducción y convección.¹¹

¹⁰ Begoña Blasco Laffón et al., *Fundamentos físicos*.

¹¹ Véase nota 10.

Dentro de las pérdidas de calor se pueden distinguir dos tipos:

- **Pérdidas por transmisión a través de la envolvente.** Incluyen la envolvente opaca y los acristalamientos. Tiene en cuenta las transmitancias térmicas U y las transmitancias térmicas lineales Ψ , relacionadas con los puentes térmicos.
- **Pérdidas por renovación de aire (ventilación).** Ocurren por fugas de aire caliente al exterior debido a una diferencia de presión en el aire o una diferencia de temperatura interior-exterior. Su valor, de acuerdo a la ecuación de cantidad de calor, es el producto del calor específico del aire por el volumen de aire renovado y por la diferencia de temperatura entre el aire interior y el aire exterior:

$$Q = C_{e_{\text{aire}}} \times m_{\text{aire}} \times (T_{\text{int}} - T_{\text{ext}})$$

Asimismo, las ganancias de calor se pueden dividir en dos clases:¹²

- **Ganancias de calor externas.** También llamadas ganancias solares, ya que son las producidas por la radiación solar incidente en la envolvente del edificio.
- **Ganancias de calor internas.** Se trata del calor que ceden los seres vivos, los equipos y los artefactos de iluminación al ambiente interior.

La temperatura interior es el resultado del equilibrio térmico entre las pérdidas y las ganancias de calor. A su vez, el balance resultante entre las pérdidas y las ganancias de calor determina la demanda de energía del ambiente o del edificio.

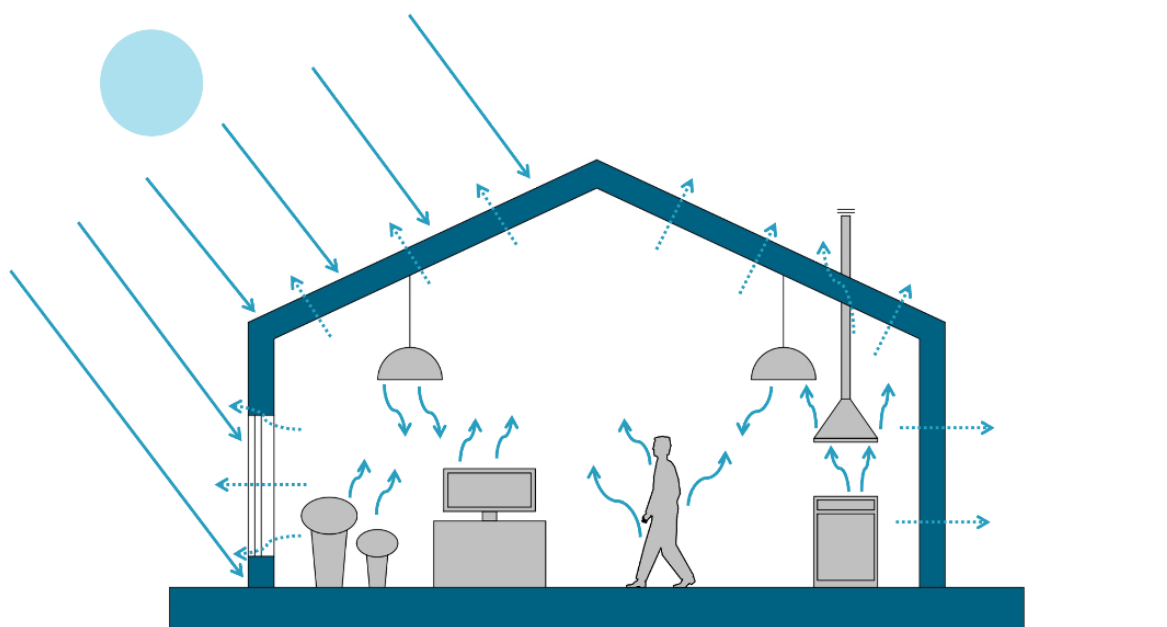


Figura 18. Pérdidas de calor (línea punteada) y ganancias de calor (línea llena) en un edificio. Fuente: elaboración propia.

¹² Maurice Croiset, *Humedad y temperatura en los edificios: Condensaciones y confort térmica de verano e invierno*, (Barcelona; Editores Técnicos Asociados, 1976).

Como ya se vio en capítulos anteriores, el **estándar Passivhaus** se caracteriza por **minimizar las pérdidas y maximizar las ganancias de calor** mediante la recuperación del calor, de manera tal que la demanda de energía para calefacción se mantenga a niveles iguales o menores a los 15kWh/m²año. Las pérdidas a través de la envolvente se reducen mediante un nivel alto de aislamiento (es decir, un valor de transmitancia térmica U muy bajo), mientras que las pérdidas por renovación de aire se reducen dotando a la envolvente de una hermeticidad que impida las fugas de aire caliente al exterior. A su vez, en el estándar se controla el ingreso de aire del exterior por medios mecánicos, y se lo mantiene a niveles mínimos para mantener la calidad del aire interior y evitar ganancias por convección innecesarias.

6.2. Difusión de vapor de agua

Conceptos básicos

El aire contiene distintos tipos de gases como nitrógeno, oxígeno, vapor de agua, etcétera. A una temperatura estable, cada uno ejerce una **presión parcial** que no se ve afectada por la presión parcial de los otros gases presentes en el aire. La suma de las presiones parciales de cada gas da como resultado la **presión total del aire**, medida en Pascales (Pa). Este enunciado se conoce como **Ley de Dalton**:¹³

$$P_{\text{aire}} = P_{\text{parcial-gas-1}} + P_{\text{parcial-gas-2}} + P_{\text{parcial-gas-n}}$$

El vapor de agua, en tanto gas presente en el aire, también ejerce su propia presión parcial. A medida que se añade vapor de agua al aire, por ejemplo, por la exudación de los seres vivos en un recinto, la presión parcial de vapor de agua aumenta. Cuando dicha presión parcial es igual a la presión de vapor saturante, el aire alcanza su punto de **saturación**, esto es, el punto en que no puede contener más agua en estado de vapor y, por lo tanto, se produce un cambio de fase en el agua, de vapor a líquido, denominado **condensación**. Como se trata de un cambio de fase, está asociado a la transmisión de calor latente. La temperatura en la que ocurre este fenómeno se conoce como **temperatura de rocío**, entendida como la temperatura en que sobreviene la saturación y por consiguiente la condensación.¹⁴

La expresión porcentual del cociente entre la presión parcial de vapor y la presión de vapor saturante, a una temperatura determinada, se conoce como **humedad relativa**:

$$HR = P_{\text{parcial-vapor}} / P_{\text{vapor-sat}} \times 100\%$$

En función de esta expresión, la humedad relativa puede aumentar en tanto aumente la cantidad de vapor en el aire (aumento de la presión parcial de vapor) o en tanto

¹³ Begoña Blasco Laffón et al., *Fundamentos físicos de la edificación II*.

¹⁴ Carlos Castro Martín, *Aislamiento térmico en edificación*.

disminuya la presión de vapor saturante, que está directamente relacionada con la temperatura: si la temperatura del aire desciende, la presión de vapor de saturación también, y la humedad relativa se incrementa.

Asimismo, se denomina peso del vapor de agua a la relación entre la masa de las moléculas de agua y la masa de las moléculas de aire presentes en un cierto volumen y expresadas en gramos de agua por kilogramo de aire seco. Esta relación se conoce como **humedad absoluta** del aire a una temperatura dada.

La **difusión de vapor de agua** es la transferencia de agua en estado de vapor de un medio con mayor presión de vapor a un medio con menor presión de vapor. En ese sentido, se considera un proceso análogo a la transferencia de calor por conducción, donde la transferencia ocurre no por diferencia de presión, sino de temperatura.¹⁵

Entonces, para que exista difusión de vapor, debe existir diferencia de presión de vapor. Como ya se observó, la presión de vapor está asociada directamente a la temperatura. De esta manera, en la situación de invierno, el interior de los recintos contendrá una temperatura y una presión de vapor superiores a la temperatura y presión de vapor exteriores. Entonces, no solo el calor tiende a transmitirse a través de la envolvente, sino también el vapor de agua, que migra hacia el medio de menor presión. En ese proceso de migración de un plano a otro de la envolvente, tal y como sucediera con el flujo de calor, los materiales que conforman el componente oponen una determinada **resistencia a la difusión de vapor de agua**.

Resistencia a la difusión de vapor de agua

Así como se estableció que la difusión de vapor es un proceso análogo a la transmisión de calor por conducción, el **factor de resistencia al vapor de agua** μ es análogo al coeficiente de conductividad térmica λ (Figura 19).

Este factor indica el grado de resistencia a la transferencia de vapor comparado con el aire en reposo (el valor de μ del aire en reposo es igual a 1). La **resistencia a la difusión de vapor de agua** se expresa entonces mediante la siguiente ecuación:¹⁶

$$R_v = N \times \mu \times e$$

Donde:

R_v = resistencia a la difusión de vapor [m/s]

N = constante [$5,4 \times 10^9$ 1/s]

μ = factor de resistencia al vapor [adimensional]

e = espesor del material [m]

¹⁵ Lluís Jutglar i Banyeras, *Aislamiento térmico*, (Barcelona: Ceac, 1998).

¹⁶ Carlos Castro Martín, *Aislamiento térmico en edificación*.

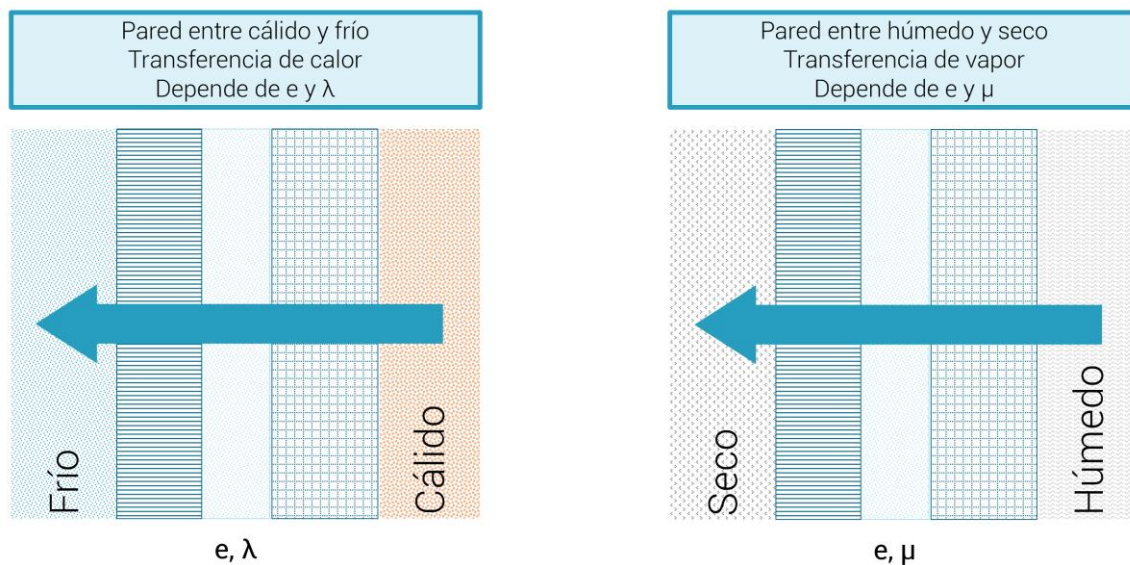


Figura 19. Paralelismos entre flujos de calor y de vapor. Fuente: Carlos Castro Martín.

Materiales resistentes al paso del vapor de agua

La resistencia al vapor de agua de los materiales es inversamente proporcional a su porosidad. Aquellos materiales de estructura porosa abierta tienden a permitir la transferencia de las moléculas de agua a través de sus poros, mientras que los materiales de constitución compacta (estructura porosa cerrada) impiden dicha transmisión.

En base a esta consideración, es posible clasificar los materiales de construcción en función de su resistencia al vapor de agua, como lo muestra la Tabla 3.

Grupo	μ	Materiales
Varios	1000-∞	Metales, láminas plásticas, vidrio, betún, asfalto, papel Kraft, vidrio celular, espuma elastomérica
Aislantes térmicos	80-200	Poliestireno extruido
	20-60	Poliuretano, poliestireno expandido
	10-20	Corcho
Materiales de construcción pesados	10	Hormigón, ladrillo, yeso
Aislantes térmicos	1	Lana mineral

Tabla 3. Resistencia al vapor de agua de materiales de construcción. Fuente: Carlos Castro Martín.

Cabe destacar el comportamiento heterogéneo de los aislantes térmicos ante el paso del vapor de agua. Mientras la lana mineral tiene una resistividad comparable a la del aire en reposo, el poliestireno extruido tiene una resistividad buena, aunque no comparable a la de metales y láminas plásticas. Estas últimas, junto con el papel Kraft, poseen tal nivel de resistividad que son utilizadas en la construcción como **barreras de vapor**, un recurso necesario a efectos de impedir la generación de condensaciones intersticiales.

Anteriormente se mencionó que la condensación ocurre cuando el aire alcanza su punto de saturación, y que esto ocurre a una determinada temperatura, denominada temperatura de rocío. En los cerramientos de los edificios, este fenómeno puede ocurrir a nivel superficial, particularmente en el paramento interior durante época invernal, o bien dentro del cerramiento, en el plano de contacto entre dos o más capas. El primer fenómeno se denomina **condensación superficial**, mientras que el segundo se denomina **condensación intersticial**.

Condensaciones superficiales

La condensación se produce porque la temperatura superficial interior T_{si} es igual o inferior a la temperatura de rocío del aire circundante. Existen dos razones que explican este fenómeno. En primer lugar, que la temperatura superficial descienda hasta tal punto, significa que la envolvente se encuentra fría, con escaso o nulo aislamiento térmico que evite la fuga de calor. En segundo lugar, la condensación se explica por la naturaleza muy húmeda del aire circundante. Si el recinto posee una gran producción de humedad y esta no es expulsada a través de la ventilación, el aire interior se encuentra próximo a su punto de saturación.

Se observó en el diagrama de temperaturas de la Figura 17 que la temperatura superficial interior es levemente inferior a la temperatura interior por causa de la resistencia térmica superficial interior que posee el aire en contacto con el cerramiento. Aunque leve, en ambientes muy húmedos y con paredes frías, esa diferencia puede significar alcanzar la temperatura de rocío y, en consecuencia, la condensación superficial.

Las condensaciones superficiales traen como consecuencia la aparición de hongos y microorganismos que generan manchas visibles en los paramentos, la alteración de las pinturas, el deterioro de los acabados, la aceleración de la oxidación de las superficies metálicas, etcétera.¹⁷

Las formas de evitar la aparición de condensaciones superficiales se basan en atacar las causas que las producen. Así, una forma de evitar el fenómeno de los cerramientos fríos es dotándolos de aislamiento térmico que aumente la resistencia térmica R del componente. De igual manera, se debe actuar sobre la producción de vapor en el interior del recinto, sea mediante una ventilación adecuada, sea eliminando o reduciendo las fuentes de vapor de agua. Adicionalmente, se debe calefactar adecuadamente para que la humedad relativa interior permanezca en niveles que no induzcan la aparición de hongos y microorganismos.¹⁸

¹⁷ Lluís Jutglar i Banyeras, *Aislamiento térmico*.

¹⁸ Carlos Castro Martín, *Aislamiento térmico en edificación*.

Condensaciones intersticiales

La condensación se produce porque la temperatura en el plano de contacto entre dos o más capas del cerramiento es igual o inferior a la temperatura de rocío. Análogamente al gradiente de temperaturas de la Figura 17, en la Figura 20 se observa el gradiente de presiones parciales de vapor. Si la presión parcial de vapor en alguno de los planos que conforma el componente alcanza la presión de vapor de saturación, el vapor condensa en ese plano.

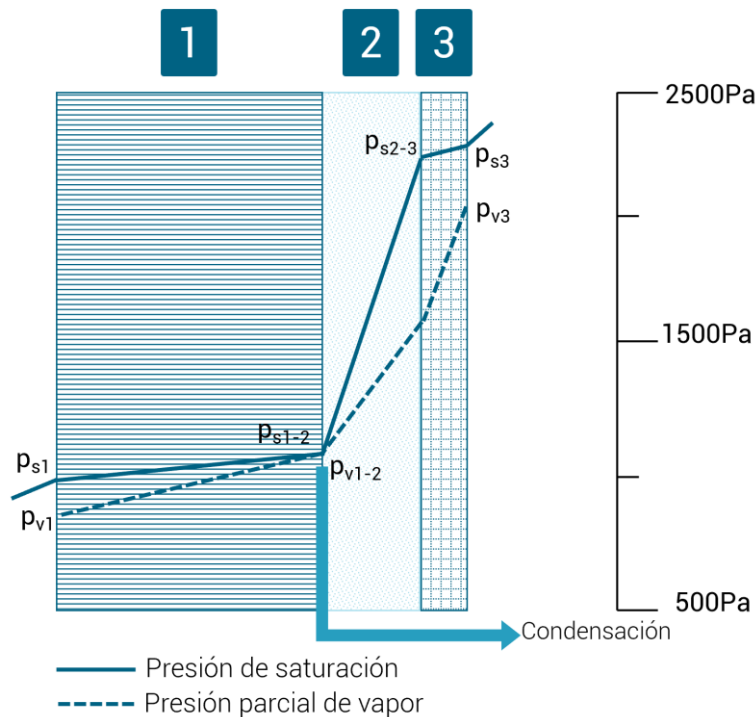


Figura 20. Diagrama de presiones de un cerramiento multicapa. Fuente: Carlos Castro Martín.

Las condensaciones intersticiales traen como consecuencia el deterioro de los materiales, la aceleración de su envejecimiento y la migración del agua condensada hacia la superficie, con la consecuente aparición de condensaciones superficiales.¹⁹

La forma de evitar la aparición de condensaciones superficiales se basa en dos premisas: colocar el aislamiento térmico lo más próximo al ambiente exterior, e interponer una barrera de vapor (un material con resistencia al vapor μ elevada) lo más próxima al ambiente interior. La barrera de vapor anula cualquier posibilidad de migración de las moléculas de agua hacia el interior del componente. De igual manera, si el aislamiento térmico se ubica lo más próximo al ambiente exterior, se evita el fenómeno de cerramientos fríos, ya que el aislamiento, debido a su gran resistencia térmica, provoca un salto de temperatura como el descrito mediante el diagrama de la Figura 17.²⁰

¹⁹ Lluís Jutglar i Banyeras, *Aislamiento térmico*.

²⁰ Carlos Castro Martín, *Aislamiento térmico en edificación*.

Cálculo de los riesgos de condensación

Para determinar si existe riesgo de condensación en un cerramiento, se utiliza el **Método Glaser** que parte de contrastar las presiones parciales de vapor en cada plano del cerramiento con las presiones de saturación en dichos planos. En este cálculo, a diferencia de lo visto en el estudio de la transmisión de calor, la resistencia superficial al paso de vapor de agua es nula y la presión parcial de vapor del aire coincide con la de la superficie de contacto. El método se resume en los siguientes pasos:²¹

- Obtener mediante el ábaco psicrométrico las presiones de saturación a lo ancho de la sección constructiva, a partir de las temperaturas de la sección.
- Obtener las presiones parciales de vapor a lo ancho de la sección constructiva, a partir de las resistencias a la difusión del vapor de los materiales del cerramiento.
- Localizar la condensación intersticial: ocurre donde la presión parcial de vapor alcanza la presión de saturación.
- Cuantificar la condensación intersticial mediante simulación anual, con medias mensuales, de los procesos de condensación invernal y de evaporación estival.

6.3. Puentes térmicos

Definición y tipologías

Los puentes térmicos son zonas de los elementos constructivos donde se producen variaciones en su uniformidad, producto de la geometría compleja de las edificaciones. Cualquier junta, quiebre, encuentro o penetración de un componente sobre otro puede constituirse como un puente térmico.

En términos generales, se los puede discriminar entre **puentes térmicos puntuales** y **puentes térmicos lineales**. Un ejemplo de puente térmico puntual lo constituye una fijación metálica que atraviesa el cerramiento, mientras que un puente térmico lineal puede ser un pilar de hormigón integrado en un cerramiento vertical.

Los puentes térmicos se pueden clasificar en tres tipos (Figura 21):²²

- **Constructivos:** por cambio de grosor en el cerramiento.
- **Geométricos:** cuando a una superficie interior le corresponde una superficie exterior mayor.
- **Cambios de material:** producidos cuando, puntual o linealmente, hay un material de mayor conductividad térmica.

²¹ Carlos Castro Martín, *Aislamiento térmico en edificación*.

²² Michael Wassouf, *De la casa pasiva al estándar Passivhaus*.

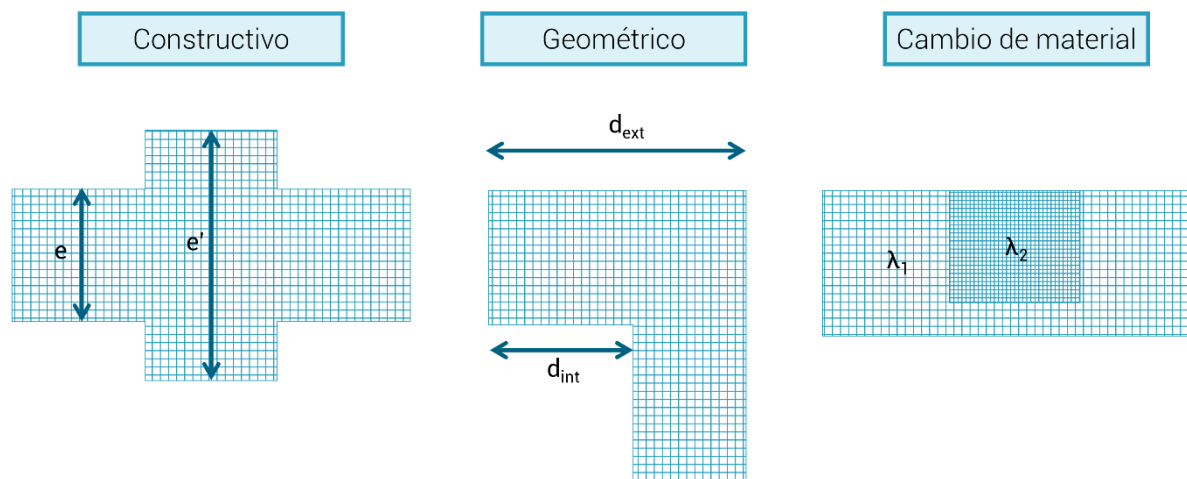


Figura 21. Esquema en planta de puentes térmicos presentes en la edificación. Fuente: elaboración propia.

Determinación cuantitativa

Energéticamente hablando, un puente térmico es la diferencia entre la calidad energética de la piel homogénea y la de la zona no homogénea, es decir, la diferencia entre el flujo de calor que atraviesa la envolvente homogénea (que a efectos de cálculo se considera unidimensional) y el flujo de calor que atraviesa el puente térmico (que es bidimensional o tridimensional).

Al tratarse de una diferencia, mientras más aislada térmicamente esté la envolvente homogénea, más grande será el flujo de calor que pase por los puentes térmicos. Por eso, en envolventes mal aisladas (con valores de transmitancia térmica U elevados), la influencia de los puentes térmicos en el balance energético es poco relevante. Empero, en edificios con un nivel de aislamiento muy alto, como los edificios construidos según el estándar Passivhaus, los puentes térmicos tienen un impacto energético muy alto.²³

Dado que los puentes térmicos lineales tienen más incidencia en el balance de pérdidas y ganancias de calor que los puntuales, interesa particularmente conocer cómo determinar el valor de las transmitancias térmicas lineales. Estas se determinan mediante la siguiente ecuación:

$$\Psi = \frac{Q_{2D}}{T_i - T_e} - \sum (A \times U)$$

Donde:

Ψ = transmitancia térmica lineal [W/mK]

Q_{2D} = flujo de calor a través del elemento mediante un modelo bidimensional [W]

²³ Michael Wassouf, *De la casa pasiva al estándar Passivhaus*.

T_i = temperatura interior [K]

T_e = temperatura exterior [K]

U = transmitancia térmica del elemento adyacente [W/m²K]

A = superficie a la que se aplica el valor U [m²]

Efectos sobre la transmisión de calor

La existencia de puentes térmicos no aislados incrementa las pérdidas de calor en invierno y las ganancias de verano, lo que perjudica el rendimiento térmico del edificio. Se estima que los puentes térmicos representan el 10% de las pérdidas de calor en invierno.²⁴ Una variación en la constitución del cerramiento da como resultado una disminución de su resistencia térmica R y un aumento de su transmitancia térmica U . Un incremento de U implica que el cerramiento es más "permeable" a que el calor lo atraviesa de un paramento a otro. Como su nombre lo indica, estas heterogeneidades se convierten en puentes por los que el calor transita de un ambiente al otro.

Cuando hay discontinuidad del aislamiento térmico por causa de un puente térmico, es indiferente que el aislamiento esté afuera, adentro o en el medio del cerramiento, las pérdidas de calor son las mismas. Lo que influye en el valor del flujo de calor es la anchura de la discontinuidad y la conductividad térmica del material de la discontinuidad.²⁵

Ahora bien, determinar el valor de ese flujo calorífico que pasa del interior al exterior a través del puente térmico no es posible con las ecuaciones formuladas en apartados anteriores. Esto se debe a que el flujo de calor en esas ecuaciones se considera unidimensional (se transfiere perpendicular al plano de cada capa de cerramiento), mientras que en los puentes térmicos el flujo de calor es bidimensional (Figura 22) o hasta tridimensional. Por tal razón, el cálculo del flujo de calor en puentes térmicos debe realizarse por métodos de elementos finitos utilizando un ordenador.

Efectos sobre la difusión de vapor

Si bien el valor de la temperatura superficial interior es clave para determinar si se producen condensaciones superficiales en los cerramientos, la ecuación enunciada para calcularla no tiene utilidad en los puentes térmicos, ya que solo es aplicable a superficies homogéneas.²⁶ En los puentes térmicos, el valor de la transmitancia térmica U se ve alterado por la discontinuidad, y el flujo de calor, como ya se expresó, no es unidimensional. En esos casos, se debe proceder a calcular la temperatura superficial interior a partir de métodos de elementos finitos (igual que el cálculo del flujo de calor

²⁴ Lluís Jutglar i Banyeras, *Aislamiento térmico*.

²⁵ Carlos Castro Martín, *Aislamiento térmico en edificación*.

²⁶ Maurice Croiset, *Humedad y temperatura en los edificios*.

bidimensional), y para representar el efecto de discontinuidad en la superficie, se adopta un valor de resistencia térmica superficial de $0,25\text{m}^2\text{K}/\text{W}$.²⁷

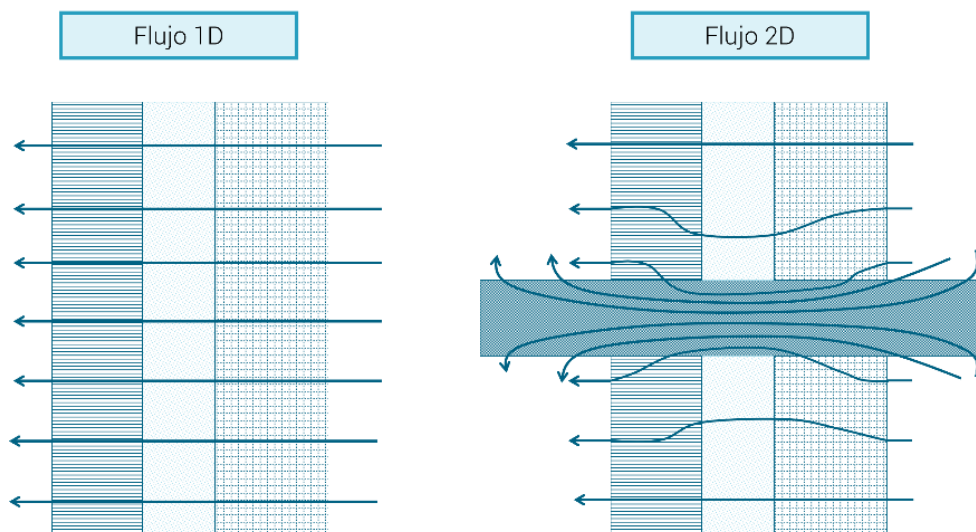


Figura 22. Flujo calorífico en cerramiento homogéneo (unidimensional) y en puente térmico (bidimensional). Fuente: Carlos Castro Martín.

En la zona del puente térmico, el incremento de la transmitancia térmica U produce una disminución de la temperatura superficial interior T_{si} , tal y como lo refleja su respectiva ecuación. A menor temperatura superficial interior, mayor riesgo de condensación superficial. En edificios con aislamiento térmico por el interior, este riesgo es aún mayor que en los sistemas de aislamiento térmico por el exterior (Figura 23).²⁸

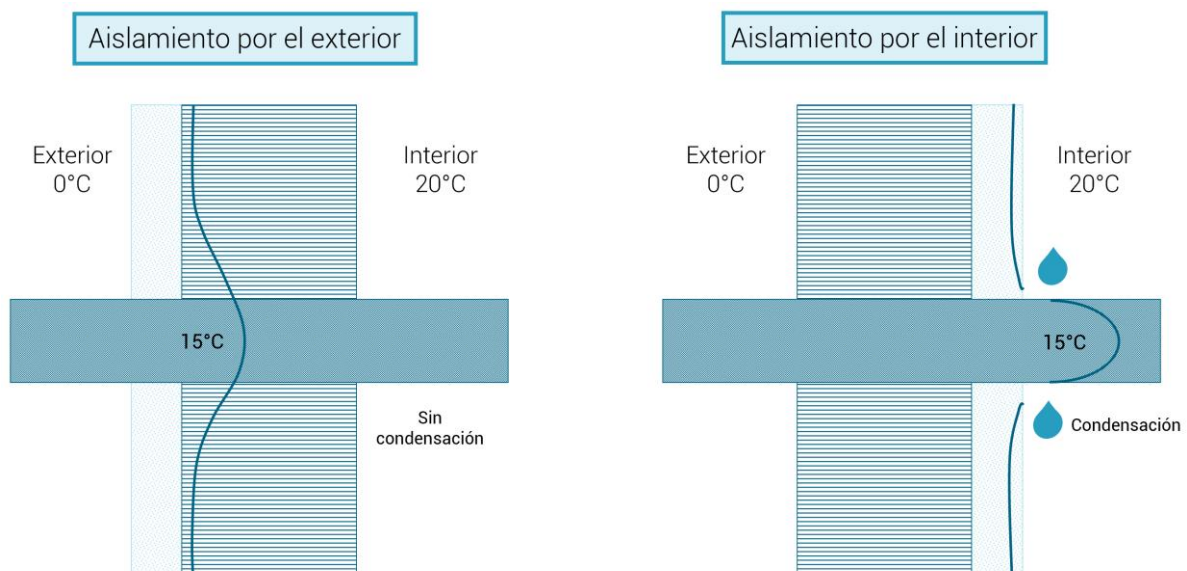


Figura 23. Puente térmico aislado por el exterior y por el interior. Fuente: Carlos Castro Martín.

²⁷ Características higrotérmicas de los elementos y componentes de edificación. Temperatura superficial interior para evitar la humedad superficial crítica y la condensación intersticial. Métodos de cálculo, UNE-EN-ISO 13788 (Madrid: AENOR, 2016).

²⁸ Carlos Castro Martín, Aislamiento térmico en edificación.

El riesgo queda determinado por el denominado **factor de temperatura superficial interior** f_{Rsi} . Se trata de un valor adimensional de 0 a 1 que define el punto más frío que puede suceder en la superficie interior de una envolvente. Por ejemplo, si el factor de temperatura es 0,7, entonces el 70% de la diferencia de temperaturas entre el aire interior y el aire exterior está presente aún en la superficie interior. El factor de temperatura superficial interior se determina en función de la siguiente ecuación:²⁹

$$f_{Rsi} = \frac{T_{si} - T_e}{T_i - T_e}$$

Donde:

f_{Rsi} = factor de temperatura [adimensional] T_i = temperatura interior [°C]

T_{si} = temperatura superficial interior [°C] T_e = temperatura exterior [°C]

Corrección de puentes térmicos

Existen tres reglas básicas para corregir los puentes térmicos:³⁰

- No romper la continuidad del aislamiento térmico.
- De existir ruptura del aislamiento térmico, utilizar en esos puntos elementos constructivos con conductividad térmica muy baja.
- Conectar diferentes elementos sin interrumpir el aislamiento térmico.

En resumen, corregir los puentes térmicos resulta necesario para evitar los efectos sobre la eficiencia energética y la higiene de la envolvente, indicados en la Figura 24, que consecuentemente afectan la higiene y la eficiencia energética de los espacios.

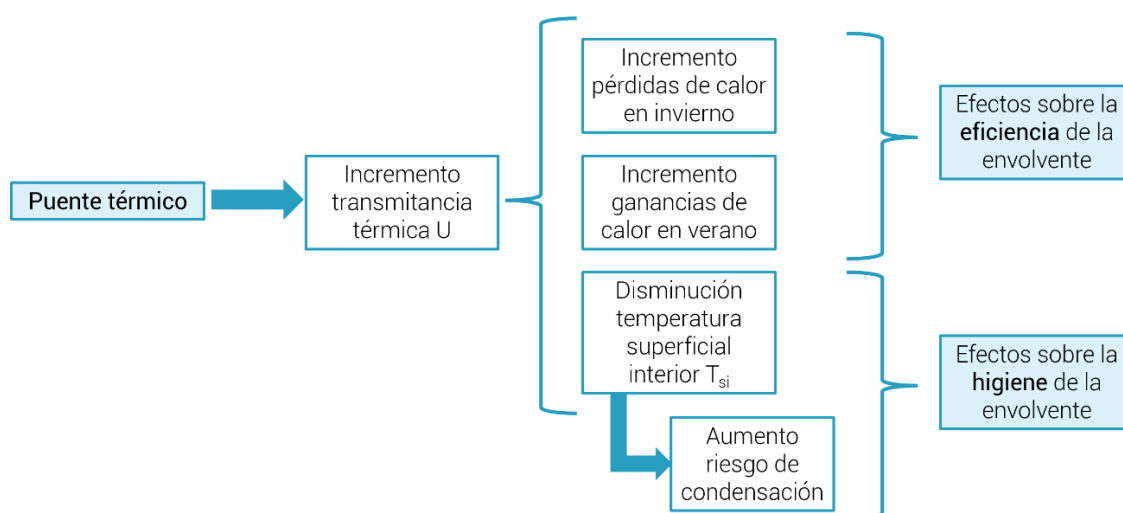


Figura 24. Efectos de los puentes térmicos sobre la envolvente. Fuente: elaboración propia.

²⁹ Carlos Castro Martín, *Aislamiento térmico en edificación*.

³⁰ Roberto Gonzalo y Rainer Vallentin, *Passive house design: Planning and design of energy-efficient buildings*, (Detail Green Books, 2016).

7. El estándar Passivhaus para componentes

El análisis del estándar y la comparación de sus requisitos con el comportamiento higrotérmico del sistema constructivo se realizan en base a la última versión disponible del documento "**Criteria and Algorithms for Certified Passive House Components: Opaque construction systems**", de febrero de 2022.³¹

Este documento se estructura en cuatro secciones:

- **Criterios de certificación.** Se indican los requisitos para que un componente opaco pueda certificarse, subdivididos en función de siete zonas climáticas.
- **Condiciones límites, cálculos.** Se indican las condiciones bajo las cuales deben llevarse a cabo los cálculos para cada uno de los criterios.
- **Información general.** Se explican, entre otros datos, las fases que constituyen el proceso de certificación, como así también la documentación necesaria para que dicho procedimiento pueda realizarse.
- **Acrónimos para las categorías, componentes del edificio y conexiones.** Se indica la nomenclatura y la clase de encuentros que se someten a examen, según se trate de la evaluación de un componente de piso, de muro, de cubierta, o un sistema constructivo.

En este capítulo se exponen los aspectos más relevantes de estas cuatro secciones del documento, útiles a efectos de cumplir los objetivos del presente trabajo.

7.1. Zonas climáticas

La Figura 25 presenta la distribución global de las siete zonas climáticas que el Instituto Passivhaus considera al momento de certificar componentes.

En el documento de criterios se remarca que la entrega de certificados de componentes solo está disponible para cuatro de las siete zonas climáticas: polar, fría, fría templada y cálida templada. A su vez, los criterios para todas las zonas climáticas están sujetos a modificaciones, a excepción de la zona fría templada. En la base de datos de componentes certificados disponible en el sitio web del Passivhaus Institut, es posible encontrar un sistema constructivo australiano certificado para clima cálido, aunque se aclara que se trata de una certificación piloto.³²

³¹ Passivhaus Institut, "Criteria and Algorithms for Certified Passive House Components: Opaque construction systems", Versión 3.1 del 7 de febrero de 2022, https://passiv.de/downloads/03_certification_criteria_construction_systems_en.pdf

³² Passivhaus Institut, "Component Database".

Si se focaliza en las zonas climáticas presentes en Europa (Figura 26), se observa que el continente posee cinco de las siete zonas, y cuatro de ellas se corresponden con las zonas para las cuales es posible certificar componentes opacos.

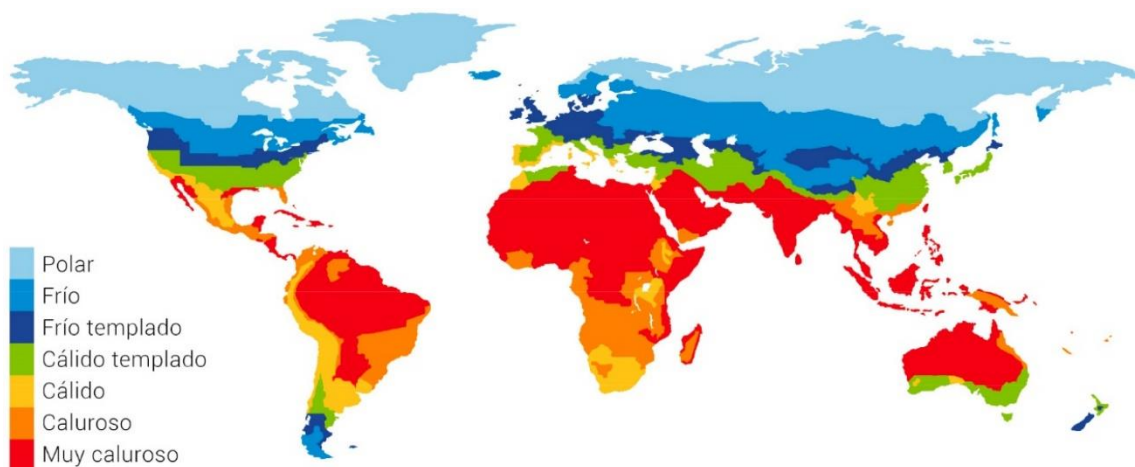


Figura 25. Zonas climáticas, basadas en estudios del Instituto Passivhaus. Fuente: Passivhaus Institut.

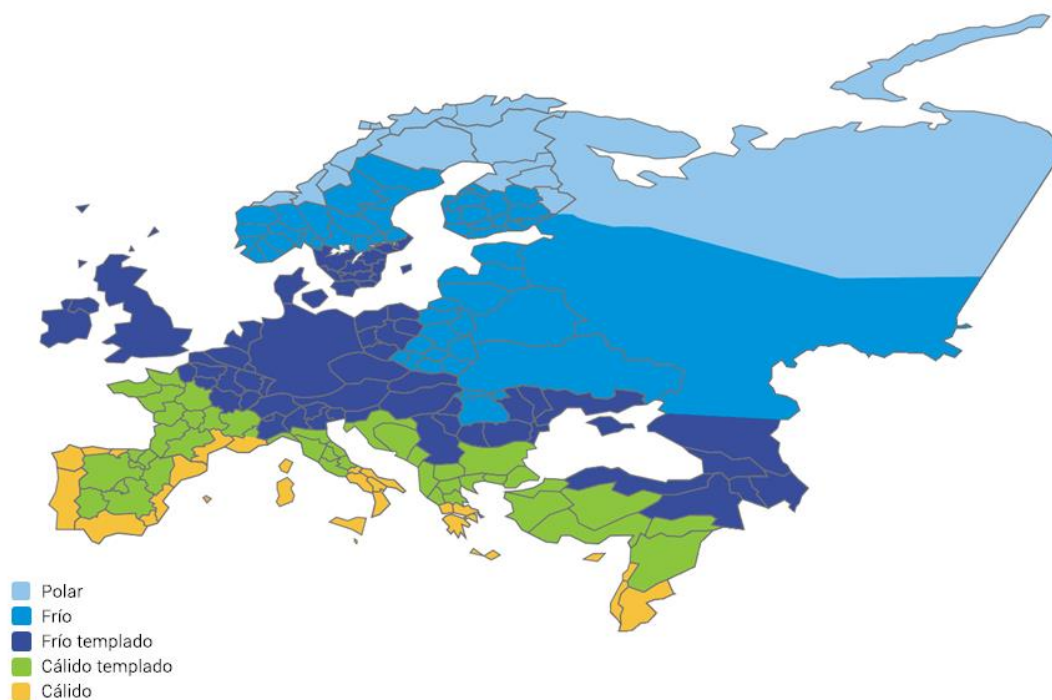


Figura 26. Zonas climáticas en Europa. Fuente: Swisspacer.

La designación de la zona climática, indica el documento, se basa en la **localización** de la sede del fabricante del componente constructivo. En el caso del sistema constructivo objeto de estudio, su desarrollo tiene sede en la ciudad de Pontevedra, al noroeste de España, localizada, según la Figura 26, en un clima cálido. Dado que el Instituto Passivhaus no certifica aún componentes para esa zona climática, corresponde realizar la evaluación para la otra zona climática presente en el territorio nacional: la **zona climática cálida templada**.

Por lo tanto, en esta investigación se opta por estudiar el sistema constructivo con las exigencias del clima cálido templado. Certificar para dicha zona climática asegura que el sistema sea apto para ser utilizado en edificios Passivhaus de toda la península, ya que, en términos de criterios de certificación, el estándar es más exigente a medida que el clima se vuelve más frío. La utilización del sistema constructivo en edificios Passivhaus, no obstante, no se reduce al territorio peninsular de España, sino que abarca toda región en el planeta que se corresponda con la zona climática cálida templada, como así también con la zona cálida, de menor exigencia.

7.2. Criterios de certificación

La Tabla 4 presenta los criterios a cumplir de acuerdo a la zona climática. Se resaltan los criterios para la zona climática cálida templada, de interés en este trabajo.

Zona climática	Criterio de higiene	Criterio de confort	Criterios de eficiencia			Criterios de humedad	
	$f_{Rsi} \geq$	U ventana instalada \leq	U del componente exterior	Detalles opacos $f_{Rsi} \geq$	Ausencia de puentes térmicos $\Psi_a \leq$	Condensación	Ma límite (DIN EN ISO 13788) \leq
	[-]	[W/m ² K]	[W/m ² K]	[-]	[W/mK]	[-]	[g/m ²]
Polar	0,80	0,45 (0,35)	0,09	0,90	0,010	Condensación evaporada al final de 12 meses	200
Fría	0,75	0,65 (0,52)	0,12	0,88			
Fría templada	0,70	0,85 (0,70)	0,15	0,86			
Cálida templada	0,65	1,05 (0,90)	0,25	0,82			
Cálida	0,55	1,25 (1,10)	0,50	0,74			
Calurosa	Ninguno	1,25 (1,10)	0,50	0,74			
Muy calurosa	Ninguno	1,05 (0,90)	0,25	0,82			

Tabla 4. Criterios de certificación de componentes constructivos de acuerdo a zona climática. Fuente: Passivhaus Institut.

La idoneidad Passivhaus se verifica usando el valor de **transmitancia térmica U** de un área representativa del componente opaco, las **transmitancias térmicas lineales Ψ** y el **factor de temperatura f_{Rsi}** en el punto más frío de los encuentros evaluables, calculados según la norma ISO 10211. El conjunto se evalúa de acuerdo a la norma DIN-EN-ISO 13788 para verificar el **riesgo de condensación intersticial**. Los resultados se comparan luego con los criterios enlistados en la Tabla 4. Si los criterios se cumplen, el sistema constructivo está en condiciones de certificarse.

Criterio de higiene

Este criterio se relaciona con la prevención de la aparición de condensaciones superficiales. Para ello, se estudia el **factor de temperatura f_{Rsi}** presente en los distintos encuentros evaluados, sean totalmente opacos o con carpinterías. El factor de temperatura, como se vio en el capítulo anterior, define el punto más frío que puede

sucedan en la superficie interior del sistema constructivo, y está directamente relacionado con los riesgos de condensación en puntos singulares de la envolvente.

En el caso del clima cálido templado, Passivhaus exige un valor de factor de temperatura mayor o igual a 0,65. Significa que, por lo menos, el 65% de la diferencia de temperaturas entre el aire interior y el exterior debe estar presente aún en la superficie interior. Asimismo, el documento aclara que el cálculo de factor de temperatura debe hacerse considerando una resistencia térmica superficial R_{si} igual a $0,25\text{m}^2\text{K}/\text{W}$, tal y como se mencionó en el capítulo anterior.

Criterio de confort

Este criterio se basa en cumplir con un valor límite de **transmitancia térmica U de la ventana instalada**. Aplica para ventanas verticales con un tamaño de prueba de $1,23 \times 1,48$ metros.

En el caso del clima cálido templado, Passivhaus exige un valor de transmitancia térmica de ventana menor o igual a $1,05\text{W}/\text{m}^2\text{K}$, con un valor máximo de transmitancia térmica del acristalamiento de $0,90\text{W}/\text{m}^2\text{K}$.

Para asegurar el cumplimiento de este criterio, se puede seleccionar una ventana que cumpla con dichos valores de transmitancia térmica de la base de datos de componentes constructivos con certificado Passivhaus, y luego aplicarla en el estudio de los encuentros con el componente opaco.

La transmitancia térmica de la ventana instalada se determina mediante la siguiente fórmula:

$$U_w = \frac{A_g \times U_g + A_f \times U_f + L_g \times \Psi_g + L_w \times \Psi_w}{A_w} \leq 1,05\text{W}/\text{m}^2\text{K}$$

Donde:

U_w = Transmitancia térmica de ventana instalada [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]

A_g = Superficie de vidrio [m^2]

U_g = Transmitancia térmica de vidrio [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]

A_f = Superficie de marco [m^2]

L_g = Longitud del puente térmico lineal entre vidrio y marco [m]

Ψ_g = Transmitancia térmica lineal del puente térmico entre vidrio y marco [W/mK]

L_w = Longitud del puente térmico lineal entre marco y muro [m]

Ψ_w = Transmitancia térmica lineal del puente térmico entre marco y muro [W/mK]

Criterios de eficiencia

Existen tres exigencias a cumplir relacionadas con la eficiencia del componente a certificar. La primera implica cumplir con el valor límite de **transmitancia térmica U** de una **sección representativa del componente opaco**. En el caso del clima cálido templado, Passivhaus exige un valor de transmitancia térmica del componente menor o igual a $0,25\text{W}/\text{m}^2\text{K}$. Asimismo, el estándar considera un factor de reducción f_R de 0,6 de la transmitancia térmica de componente para áreas en contacto con el terreno y hacia un sótano no acondicionado en las zonas climáticas polar, fría, fría templada y cálida templada. En los demás casos, el factor de reducción será igual a 1, por lo que no afecta al valor de la transmitancia térmica del componente.

Respecto al cálculo de la transmitancia térmica U, el estándar indica que se lleva a cabo de acuerdo con las reglas técnicas generales, esto es, siguiendo el procedimiento visto en el capítulo de fundamentos teóricos. Se deben tener en cuenta las interrupciones en la capa de aislamiento. En cuanto a los valores de **conductividad térmica λ** de los materiales que conforman el componente, el Passivhaus Institut indica que se deben usar los valores nominales especificados en cualquiera de las siguientes normas: DIN-V 4108-4, DIN-EN-ISO 10077-2 o DIN-EN-ISO 10456. En el documento de criterios se diferencia entre **valor nominal** y **valor declarado**, siendo este último el que surge de ensayos llevados a cabo por instituciones reconocidas conforme a cualquiera de las siguientes normas: ISO 8302, EN 12664, EN 12667 y EN 12939. Solo en casos en que no se cuente con valores nominales, se acepta utilizar los valores declarados de conductividad térmica. El Passivhaus Institut se reserva el derecho de aplicar un coeficiente de seguridad del 25% a los valores declarados a utilizar en el cálculo.

La segunda exigencia se refiere al valor mínimo del **factor de temperatura f_{Rsi}** en encuentros estrictamente opacos del cerramiento. En el caso del clima cálido templado, Passivhaus exige un valor de factor temperatura mayor o igual a 0,82. Significa que, por lo menos, el 82% de la diferencia de temperaturas entre el aire interior y el aire exterior debe estar presente aún en la superficie interior. Las condiciones de estudio son las mismas ya enunciadas para el criterio de higiene, es decir, se considera una resistencia térmica superficial R_{si} de $0,25\text{m}^2\text{K}/\text{W}$.

La tercera exigencia se refiere al valor máximo de **las transmitancias térmicas lineales Ψ** que existen en los puentes térmicos de la envolvente. El coeficiente de pérdidas por puentes térmicos se basa en dimensiones y longitudes exteriores. El estándar indica que conexiones específicas, como el puente térmico resultante del encuentro entre el muro y el marco de la ventana, o los puentes térmicos geométricos producidos en esquinas entrantes con aislamiento térmico continuo, están exentos de cumplir este criterio. Pero, en cualquier caso, esto no afecta el cumplimiento de los demás criterios. Para todas las zonas climáticas, Passivhaus plantea la misma exigencia: un valor de transmitancia térmica lineal igual o inferior a $0,010\text{W}/\text{mK}$. La verificación del

cumplimiento de esta exigencia se realiza mediante **simulaciones de flujo de calor multidimensionales**, es decir, por medio de ordenadores y softwares apropiados, tal y como se estableciera en el capítulo anterior.

Criterios de humedad

El estándar indica que estos criterios se basan en el **Método Glaser**, ya descrito precedentemente y recogido por la norma ISO 13788. Se evalúa la probabilidad de que ocurra condensación intersticial en el componente en invierno. El documento plantea que, si las exigencias no se cumplen aplicando este método, se puede recurrir a simulaciones dinámicas por métodos establecidos en la norma EN 15026 para una comprensión más detallada.

La primera exigencia dentro de este criterio indica que, en el plazo de un año, toda condensación que se produzca en época invernal debe ser evaporada en el período estival. En cuanto a la segunda exigencia, **M_a límite** hace referencia al contenido máximo acumulado de humedad y refleja la cantidad límite de condensación admisible para evitar el escurrimiento de agua líquida de las superficies estancas. Para todas las zonas climáticas, Passivhaus plantea la misma exigencia: un valor de contenido máximo acumulado de humedad igual o inferior a 200g/m².

Otros requisitos

Además de los criterios enlistados en la Tabla 4, durante el procedimiento de certificación, el Instituto Passivhaus verifica la calidad de la hermeticidad del componente, que debe verse reflejada en los detalles constructivos.

Condiciones límites

Los cálculos de flujo de calor multidimensional deben realizarse teniendo en cuenta las temperaturas y resistencias térmicas superficiales indicadas en la Figura 27.

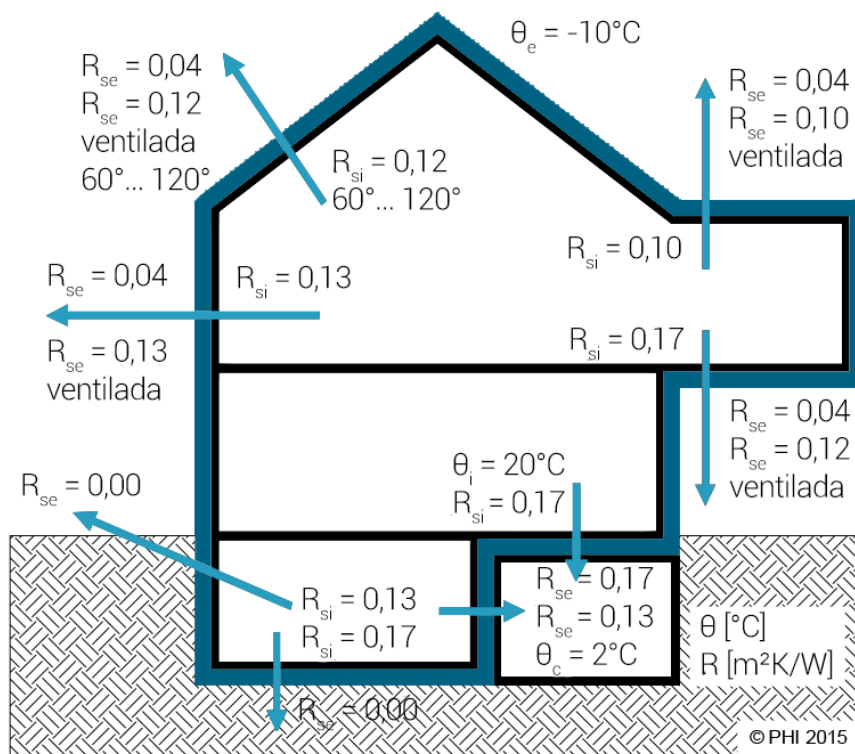


Figura 27. Temperaturas y resistencias térmicas superficiales para cálculo de flujos de calor. Fuente: Passivhaus Institut.

Como ya se mencionó, para el cálculo del factor de temperatura, tanto en encuentros opacos como en encuentros con carpinterías, se debe adoptar un valor de resistencia térmica superficial interior R_{si} de $0,25\text{m}^2\text{K}/\text{W}$.

Por otro lado, en el cálculo de riesgo de condensación, las temperaturas y humedades interiores y exteriores a adoptar se basan en las medias mensuales del emplazamiento, siguiendo las directrices de la norma ISO 13788.

7.3. Detalles constructivos evaluables

La cantidad y tipo de encuentros a considerar depende de la clase de componente opaco a certificar: piso, muro, cubierta o sistema constructivo. Por ejemplo, un componente de muro no requiere verificar el encuentro entre dos faldones de cubierta. Se evalúan principalmente **detalles bidimensionales**. A efectos de la certificación, puede no ser necesario evaluar detalles individuales (unidimensionales). Los detalles tridimensionales, por otra parte, se estudian en los casos de puentes térmicos puntuales, si existen. Llegado el caso, se recurre a softwares de simulación tridimensional en acuerdo con la norma ISO 10211.

La Figura 28 presenta los detalles constructivos tipo que se tienen en cuenta en la evaluación de los componentes opacos. Se utilizan las nomenclaturas presentadas en la Tabla 5.

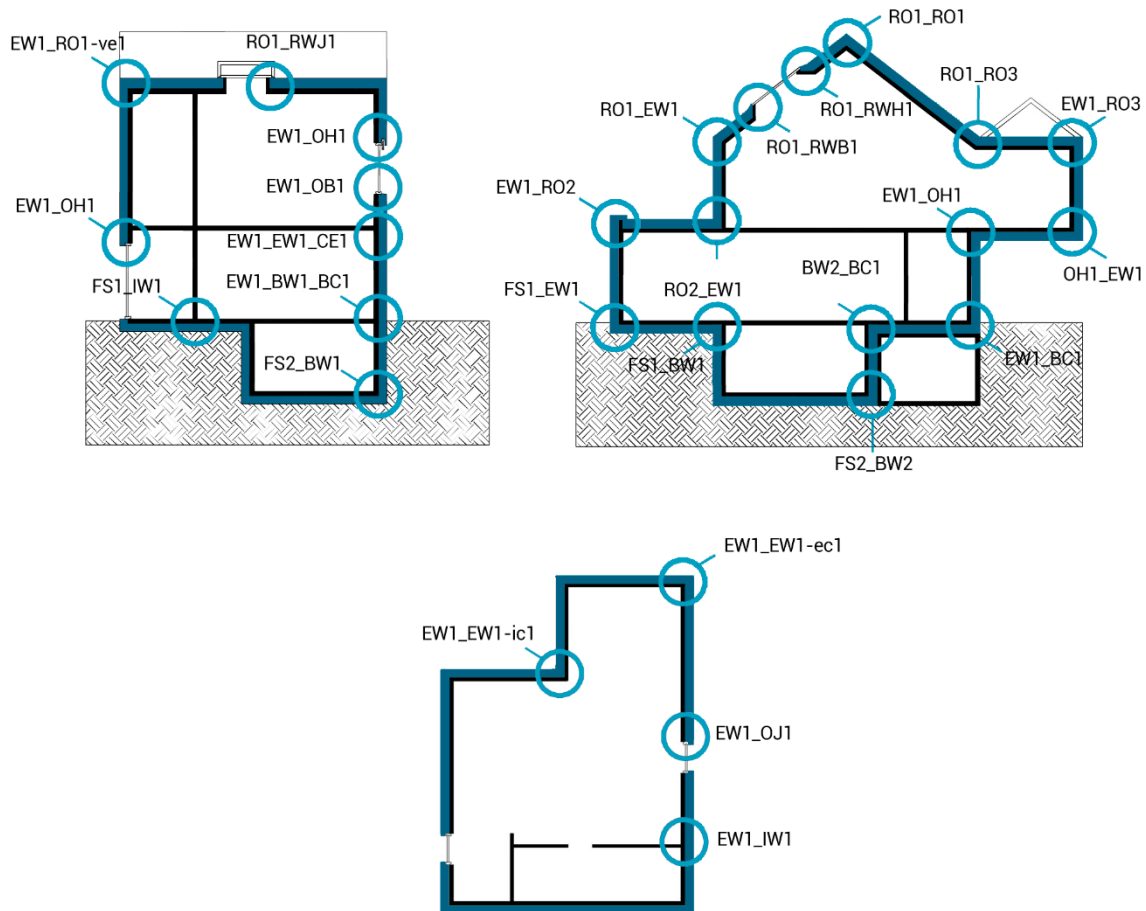


Figura 28. Detalles constructivos evaluables en el estándar Passivhaus para componentes constructivos opacos. Fuente: Passivhaus Institut

Nomenclatura	Denominación en inglés	Componente
EW	<i>Exterior wall</i>	Muro exterior
IW	<i>Separating Internal wall</i>	Tabique
RO	<i>Roof</i>	Cubierta
CE	<i>Ceiling</i>	Forjado
FS	<i>Floor slab</i>	Solera
BC	<i>Basement ceiling</i>	Forjado de sótano
BW	<i>Basement wall</i>	Muro de sótano
OH	<i>Overhang</i>	Voladizo
OB	<i>Window bottom (openable)</i>	Alféizar de ventana practicable
OJ	<i>Window side (openable)</i>	Jamba de ventana practicable
OH	<i>Window top (openable)</i>	Dintel de ventana practicable
RWB	<i>Roof window bottom</i>	Alféizar de ventana de techo
RWJ	<i>Roof window side</i>	Jamba de ventana de techo
RWH	<i>Roof window top</i>	Dintel de ventana de techo
ic	<i>Internal corner</i>	Esquina entrante
ec	<i>Exterior corner</i>	Esquina saliente
ve	<i>Verge</i>	Borde

Tabla 5. Nomenclatura de componentes y encuentros en el estándar Passivhaus. Fuente: Passivhaus Institut.

8. El sistema constructivo modular de aluminio extrusionado

En términos generales, la envolvente de un edificio construido con este sistema está delimitada por tres tipos de componentes: dos **muros estructurales** conformados por los paneles de aluminio extrusionado y un trasdosado; una **cubierta inclinada** de igual composición que los muros estructurales; y dos **fachadas hastiales no portantes** que contienen las superficies vidriadas y un acabado exterior a manera de fachada ventilada (Figura 29). Este esquema se mantiene constante, independientemente de la cantidad de volúmenes, la inclinación de las cubiertas, la implantación del edificio, etcétera.



Figura 29. Edificio construido con el sistema constructivo, donde se aprecian los tres componentes de la envolvente. Fuente: Proyectopía, S.L.

8.1. Componentes y materiales

El sistema constructivo consta de distintos componentes que conforman la envolvente y las subdivisiones del edificio: aislamiento, forjados, tabiques, acabados interiores, etcétera. En este subcapítulo se presentan las características de dichos componentes, en base a los datos que figuran en la memoria de calidades del sistema³³ y la información provista por quienes desarrollaron el proyecto empresarial que dio origen al sistema, y que hoy en día lo aplican en la construcción de viviendas en el noroeste de España. En el subcapítulo siguiente se los presenta gráficamente mediante detalles constructivos diseñados por el inventor del sistema.³⁴

³³ Proyectopía S.L., "Proyectopía: Memoria de calidades".

³⁴ Víctor Hermo Sánchez, *Plano de detalles constructivos* [Plano], 1:10 y 1:20, 2020.

Cimentación

Habitualmente, los edificios construidos con este sistema se cimentan sobre una solera de hormigón ventilado de espesor variable según las condiciones del terreno. Se la construye de hormigón armado sobre encofrado perdido de módulos de polipropileno y con viga de borde de 30x50 centímetros (Figura 30). Bajo la cimentación se coloca un hormigón de limpieza de 10 centímetros de espesor que se usa para homogeneizar la superficie, apoyar el encofrado perdido y armar la viga de borde.



Figura 30. Cimentación con solera de hormigón ventilado. Fuente: Patricia Liñares Méndez.

Muro tecnológico

Se denomina así al **muro multicapa** portante y ventilado de unos 30 centímetros de espesor (varía en función del tipo de acabado). Está conformado por los paneles modulares de aluminio extrusionado y un trasdosado de unos 20 centímetros con aislamientos (hidráulico, termo-acústico y barrera de vapor) y acabado interior.

- **Paneles modulares de aluminio extrusionado.** La capa exterior está formada por paneles de aluminio en forma de omega, de 90x300 milímetros de sección y hasta 12 metros de longitud. La forma omega proporciona una cámara de aire ventilada de 80 milímetros de espesor. Los paneles se sujetan a la viga de borde de la solera mediante un perfil L de aluminio, como el que se observa en la Figura 31.

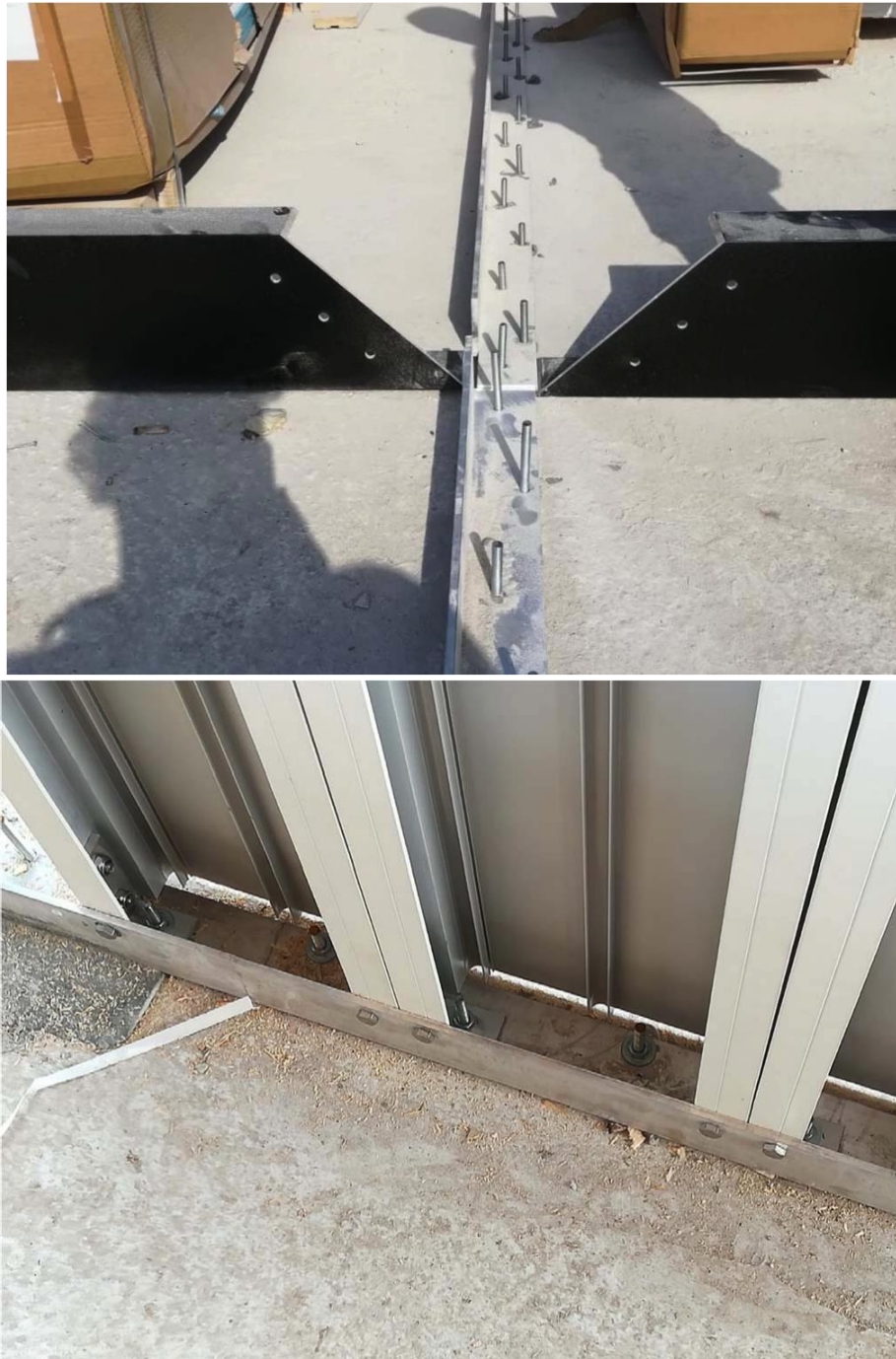


Figura 31. Fijación de perfil L sobre cimentación (arriba) y sujeción de paneles de aluminio sobre perfil (abajo). Fuente: Patricia Liñares Méndez.

- **Trasdosado.** Está compuesto por una membrana continua impermeable y transpirable a fin de conseguir una fachada estanca al agua y al viento (pero permeable al vapor de agua), un tablero de OSB de 15 milímetros de espesor, un aislamiento térmico de lana mineral de 170 milímetros, una barrera de vapor en la cara caliente del aislamiento y un tablero de acabado que puede variar en función de las características del proyecto. En esta capa se colocan las instalaciones necesarias para el funcionamiento del edificio.

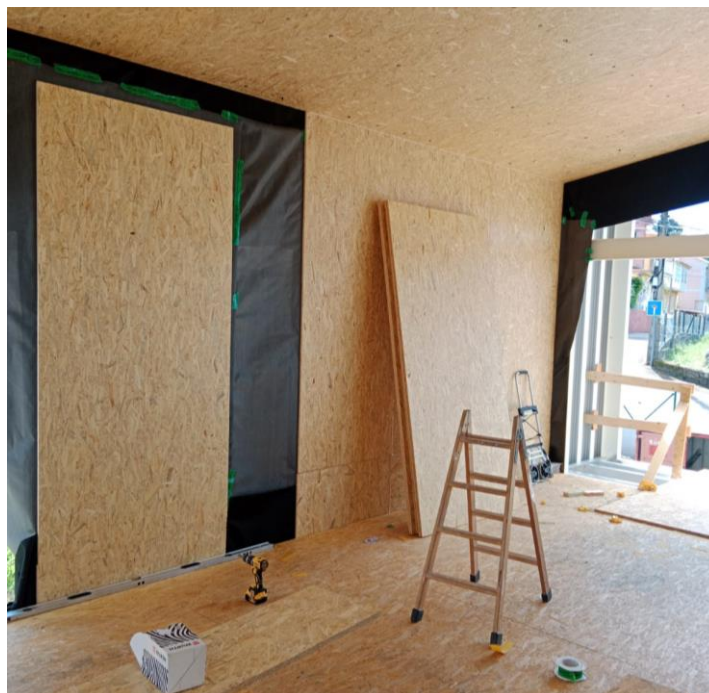


Figura 32. Construcción del trasdosado. Fuente: Víctor Hermo Sánchez.

Cubierta

Este cerramiento también se constituye como un componente multicapa portante y ventilado. Dadas las características de los paneles de aluminio, se pueden construir cubiertas inclinadas de distintas pendientes, como se observa en los apartamentos turísticos que sirven de prototipos (Figura 33). La unión entre los paneles tipo *cassette* del muro y los de la cubierta (Figura 34) se efectúa mediante una pletina mecanizada.



Figura 33. Configuraciones posibles de cubierta en los apartamentos turísticos Mardesía. Fuente: fotografía propia.



Figura 34. Unión entre paneles de muro y paneles de cubierta. Fuente: Patricia Liñares Méndez.

Forjados

El forjado de planta baja que se apoya sobre la solera consta de doble capa de aislamiento térmico (planchas de poliestireno extruido), apoyada a su vez sobre una lámina plástica anti capilaridad. La subestructura entre las planchas de aislamiento puede conformarse tanto con tacos de madera como con rastreles del mismo material. Sobre el aislamiento térmico se dispone un tablero de OSB de 22 milímetros, sobre el cual se instala el acabado de suelo correspondiente.



Figura 35. Aislamiento térmico de forjado sobre solera. Fuente: Víctor Hermo Sánchez.

Por su parte, el forjado que separa la planta baja de la primera planta está formado por una estructura de vigas I con alas de LVL (madera microlaminada, por sus siglas en inglés, *laminated veneer lumber*) y alma de tablero de OSB. Por el plano superior e inferior de las vigas se sujetan dos tableros de OSB, uno de 15 milímetros en la parte inferior, y otro de 22 milímetros en la parte superior. Ambos se colocan atornillados y con adhesivo estructural. Se obtiene así un forjado rígido y hueco por donde circulan las instalaciones del edificio. Las vigas del forjado se apoyan en los paneles de aluminio extrusionado mediante un perfil U de aluminio de 80×200 milímetros, como se observa en la Figura 36. El panel de OSB inferior se fija una vez colocadas las instalaciones.



Figura 36. Unión entre paneles de muro y vigas de forjado. Fuente: Patricia Liñares Méndez.

Fachadas hastiales

En estos cerramientos no portantes se instalan las carpinterías en conjunto con un acabado exterior opaco que puede adquirir distintas terminaciones. Poseen su propia subestructura de perfiles U de aluminio de 80×200 milímetros. En conjunto conforman marcos rigidizadores que son a su vez los elementos de unión con los muros portantes, la cubierta y la solera (Figura 37). Estas uniones se sellan de manera tal de contribuir a la estanqueidad de toda la envolvente.



Figura 37. Marcos de fachadas hastiales y su unión a los demás componentes del sistema. Fuente: Patricia Liñares Méndez.

Las fachadas hastiales constan de un trasdosado conformado por tablero de OSB de 15 milímetros de espesor (con membrana impermeable transpirable en la cara al exterior, tal y como sucede en el muro portante), un aislamiento de lana mineral de 100 milímetros entre rastrelados de madera, y tablero OSB de 15 milímetros de espesor del lado interior. Asimismo, la capa interna se construye con un aislamiento térmico de lana mineral de entre 50 y 70 milímetros de espesor, una barrera de vapor en la cara caliente del aislamiento y un tablero de acabado.

Al exterior, el sistema admite las siguientes terminaciones, a manera de fachada ventilada (Figura 38):

- **Panel de piedra natural.** Se trata de una lámina de piedra natural de grandes dimensiones.
- **Madera termotratada.** Consta de tablas de madera sometidas a un tratamiento térmico, con color homogéneo y elevada resistencia a hongos, insectos y humedad.
- **Cedral.** Lama de cemento reforzado resistente y ligera con acabados símil madera y de bajo mantenimiento.



Figura 38. Posibles acabados de fachadas hastiales. De izquierda a derecha: panel de piedra natural, madera termotratada y cedral. Fuente: Proyectopía S.L.

Carpintería exterior

Se aplican indistintamente ventanas de hojas fijas o abatibles, y pueden incluir dispositivos de oscurecimiento. En cuanto a los modelos utilizados en la construcción con este sistema, se opta generalmente por las carpinterías de aluminio anodizado con ruptura de puente térmico. En acristalamientos, los más usados en la edificación con este sistema son los dobles bajo emisivos con argón y los vidrios triples. Tal y como sucede en la unión entre fachadas hastiales y muros portantes y cubiertas, el encuentro de las carpinterías con el resto de la fachada hastial posee características estancas. En general, esto se consigue mediante el sellado de los planos de unión con espuma de poliuretano. Se las instala de manera tal que la parte fría de la abertura esté en contacto con el aluminio de los marcos rigidizadores, y la parte caliente en contacto con el trasdosado de OSB.

En el caso de utilizar carpinterías en los muros portantes, se aplica igual criterio que en las fachadas hastiales. Se coloca la carpintería de manera tal que su parte fría esté en contacto con el elemento metálico del cerramiento (los paneles de aluminio extrusionado) y su parte caliente en contacto con el tablero de OSB del trasdosado.

Tabiquería

Se construye con una subestructura de madera o aluminio, rellena de lana mineral. Existen tres opciones de acabado, también aplicables al acabado interior de la envolvente (muros portantes, cubierta y fachadas hastiales):

- **Tablero de madera orientada OSB.** Consta de placas de 600×240×15 milímetros, o de 9 milímetros de espesor en el caso de que el acabado se aplique en techos. En todos los casos el acabado es al natural con barniz ecológico.
- **Madera cemento.** Al igual que los tableros de OSB, se presenta en placas de 600×2400×15 milímetros en paredes, y de 9 milímetros en techos. Puede tener un acabado natural o pintado.
- **Yeso laminado.** Se trata de doble placa de yeso compuestas de un alma de yeso con aditivos y revestida con cartón especial. Se utilizan placas de 15 milímetros de espesor tanto en paredes como en techos, con acabado pintado.

Pavimentos

Al igual que los acabados de los cerramientos verticales y de la cubierta, también existen diferentes opciones de acabados para los pavimentos (Figura 39).

- **Tablero de virutas de madera orientadas (OSB).** Se aplican tableros de 600×2400×22 milímetros, con acabado natural con barniz ecológico.
- **Tarima flotante.** El tipo de tarima difiere según la clase de ambiente al que sirve, y sus dimensiones son de 193×1291×8 milímetros.
- **Madera noble laminada.** Esta terminación permite varios tipos de acabados, y posee unas dimensiones de 190×2400×12,5 milímetros.



Figura 39. Opciones de acabado de pavimentos. De izquierda a derecha: tablero OSB, tarima flotante y madera noble laminada. Fuente: Proyectopía S.L.

8.2. Detalles constructivos

Las Figuras 40 a 42 expresan gráficamente las descripciones de materiales del subcapítulo anterior. La Tabla 6, por su parte, contiene las referencias utilizadas en las figuras. Asimismo, en las Tablas 7 a 11 se observa con mayor detalle la resolución de los encuentros entre los distintos componentes que conforman el sistema constructivo.

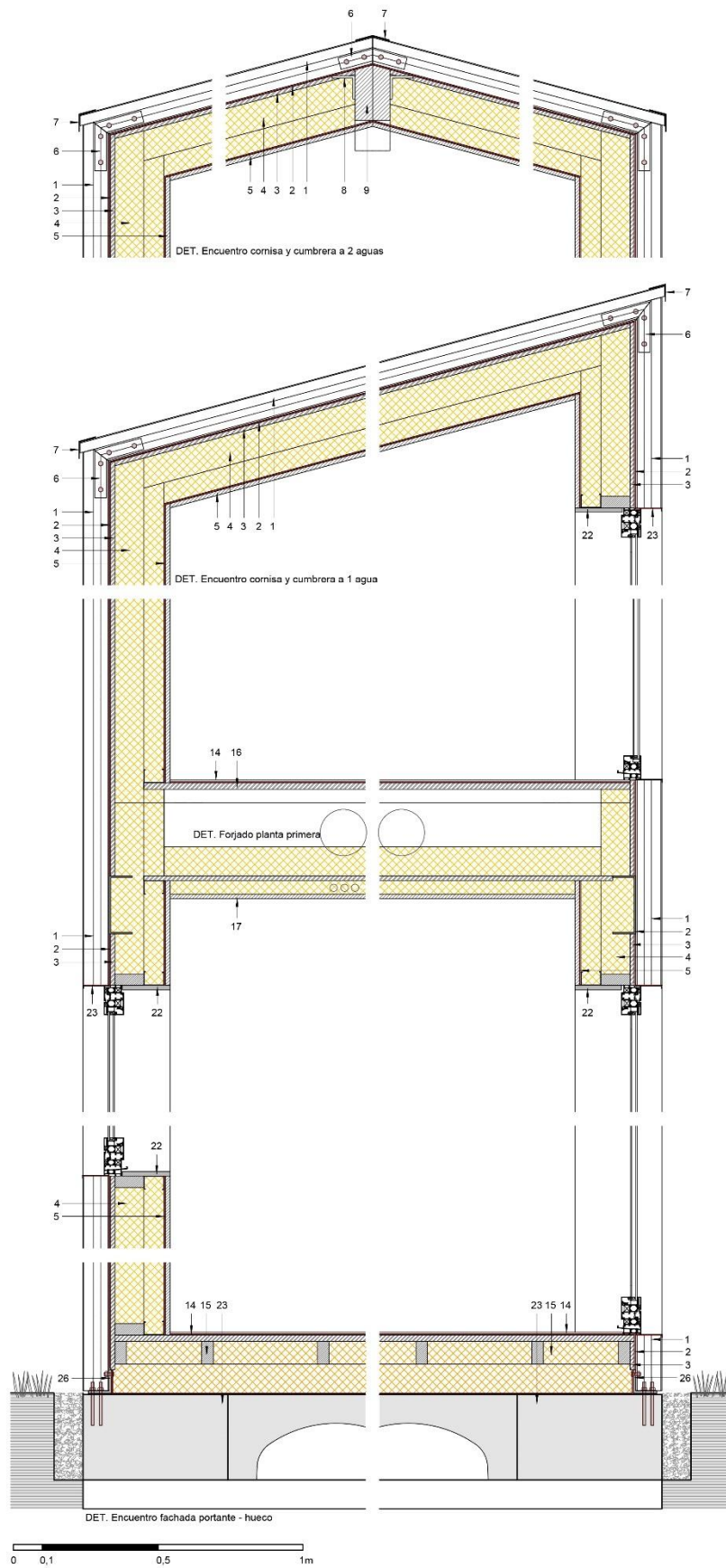


Figura 40. Detalles constructivos en muro tecnológico o portante. Fuente: Víctor Herno Sánchez.

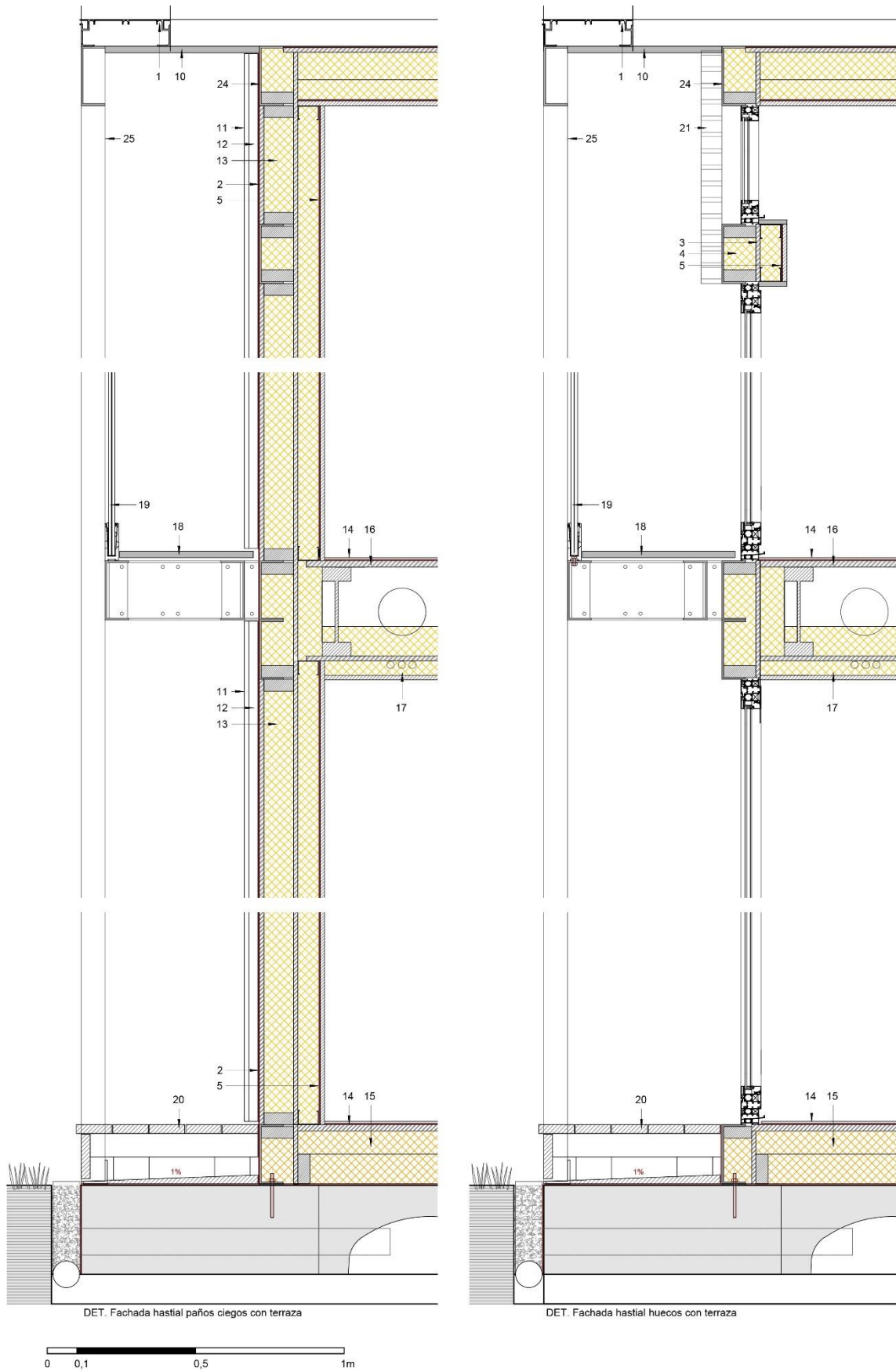


Figura 41. Detalles constructivos en fachadas hastiales. Fuente: Víctor Hermo Sánchez.

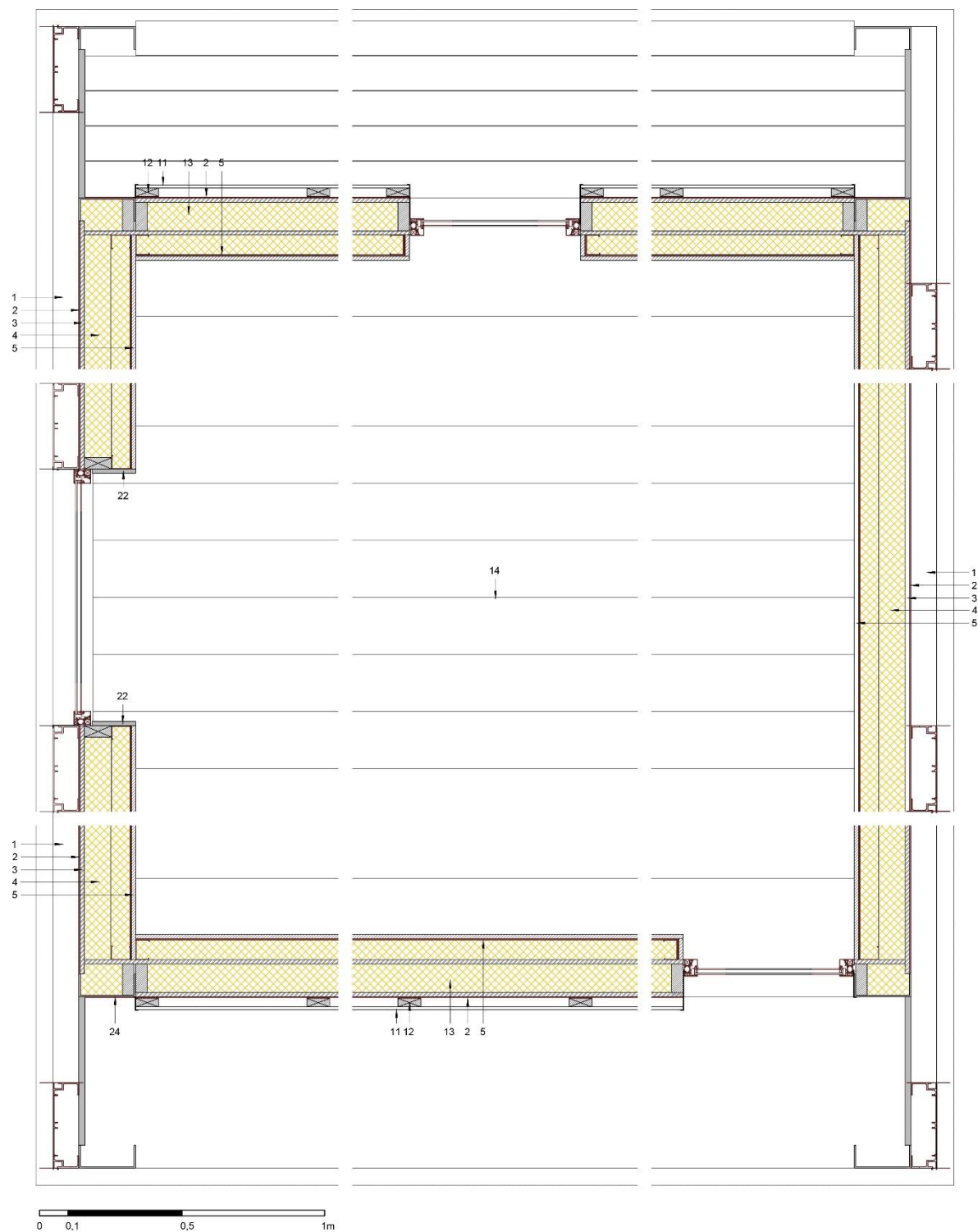


Figura 42. Detalles constructivos en planta. Fuente: Víctor Hermo Sánchez.

N°	Referencia	N°	Referencia
1	Panel Proyectopía	16	Base de pavimento de planta primera: vigas de OSB HB 97 300, acabado superior de tablero OSB3 22mm e inferior de tablero de OSB3 15mm
2	Lámina impermeable transpirable tipo Tyvek	17	Falso techo 50 mm lana de roca, con tablero de acabado
3	Tablero de OSB3 15mm	18	Pavimento de terraza, tablero de madera cemento de 22mm
4	Aislamiento térmico de lana mineral	19	Barandilla
5	Trasdosado autoportante interior con barrera de vapor en cara caliente del aislamiento, 50-70mm, y tablero de acabado	20	Pavimento exterior de madera sobre rastreles y mortero de pendiente
6	Pletina de unión entre panel de fachada y cubierta mecanizado según ángulo de cubierta	21	Protección solar de lamas
7	Remate de chapa plegada de 2mm, sellada con membrana autoadhesiva Effisus	22	Recercado interior de hueco con tablero de madera cemento de 15mm
8	L80.8 para sujeción de panel de cubierta con viga de madera laminada de cumbrera	23	Recercado exterior de hueco con chapa plegada de 1.2mm lacada
9	Viga de madera laminada GL24h, dimensiones según plano de estructura	24	Marco portante de aluminio
10	Trasdosado exterior de panel de aluminio con tablero de madera cemento de 22mm	25	Marco estético de aluminio
11	Acabado exterior de fachada hastial	26	L80.8 arranque de panel Proyectopía colocada sobre mortero autonivelante expansivo
12	Rastreles de madera, con tratamiento autoclave, 30x80mm	27	Solera de hormigón, dimensiones y armado según planos de estructura
13	Panel autoportante de fachada formado por rastrelado de madera 100x35mm y panel OSB3 15mm en ambas caras	28	Canalón de chapa plegada de 2mm
14	Pavimento de tarima, colocado sobre lámina de polietileno espumado 5mm y barrera de vapor	29	TR.160.80.8 + 2 L60.6 para formación de bajante de canalón, remate y sujeción de marco portante en fachada hastial
15	Base de pavimento de planta baja: tacos/rastreles de madera de pino con tratamiento autoclave, acabado superior de tablero OSB3 22mm y relleno de aislante térmico XPS sobre lámina anti capilaridad		

Tabla 6. Referencias de los detalles constructivos del sistema. Fuente: Víctor Hermo Sánchez.

Tipo de encuentro	Detalle	Descripción
Solera y fachada hastial (cerramiento opaco)		<p>Se observa la fijación a la viga de borde del perfil U de aluminio que conforma el marco rigidizador de esta parte de la envolvente. El acabado interior posee una subestructura metálica, dentro de la cual se aloja una de las capas de aislamiento térmico.</p> <p>Al exterior, sobre la solera, se dispone un mortero de pendiente y se utiliza madera sobre rastreles como pavimento.</p>
Solera y fachada hastial (carpintería)		<p>Se verifica que la parte fría de la carpintería está en contacto con el elemento metálico (perfil del marco rigidizador), y la parte caliente está en contacto con el OSB.</p>
Solera y muro portante		<p>Se observa la viga de borde y el encofrado perdido que forma la cámara ventilada de la solera.</p> <p>Los paneles de aluminio se fijan a la cimentación mediante perfil L, que se coloca sobre mortero autonivelante expansivo. Sobre ese plano se instala una lámina anti capilaridad.</p> <p>En este caso, no hay proyección de la solera para conformar un pavimento exterior.</p>

Tabla 7. Encuentros con solera. Fuente: elaboración propia en base a Víctor Hermo Sánchez.

Tipo de encuentro	Detalle	Descripción
<p>Forjado y fachada hastial (cerramiento opaco)</p>		<p>Se observa el forjado de vigas I con placas de OSB, que cuenta a su vez con aislamiento termo-acústico. Se evita el puente térmico de balcón al apoyar su estructura en los paneles del muro portante, en lugar de utilizar como apoyo los marcos rigidizadores de la fachada hastial. A su vez, esta solución mantiene la continuidad de la lámina impermeable transpirable.</p>
<p>Forjado y fachada hastial (carpintería)</p>		<p>Los perfiles de aluminio que conforman los marcos rigidizadores funcionan a su vez como alféizar y dintel de las carpinterías colocadas en fachada hastial. Se observa la ubicación de la parte fría de la ventana en contacto con los perfiles, y la parte caliente en contacto con el OSB. El plano de apoyo se sella con espuma de poliuretano.</p>
<p>Forjado y muro portante</p>		<p>Al poseer la estructura del lado exterior del cerramiento, existe continuidad en el aislamiento térmico. Se aprecia el perfil U de aluminio sobre el que se apoyan las vigas I que conforman el forjado.</p>

Tabla 8. Encuentros con forjado. Fuente: elaboración propia en base a Víctor Hermo Sánchez.

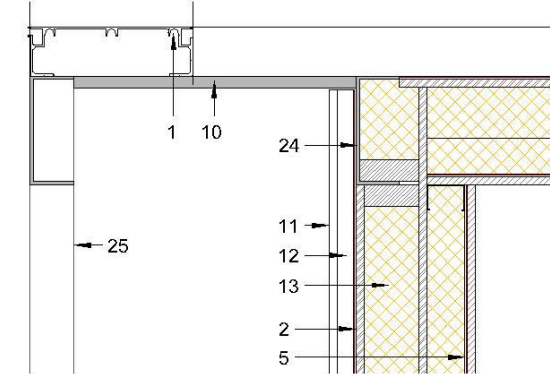
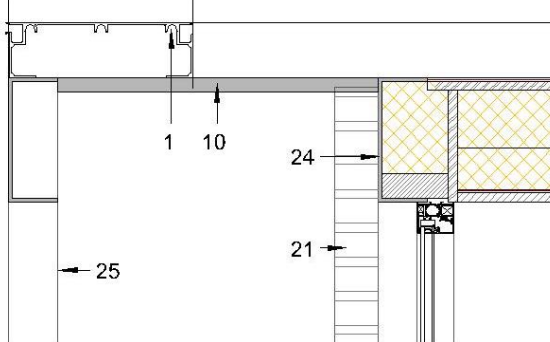
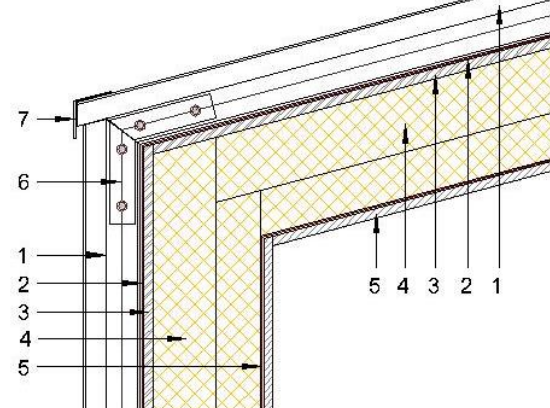
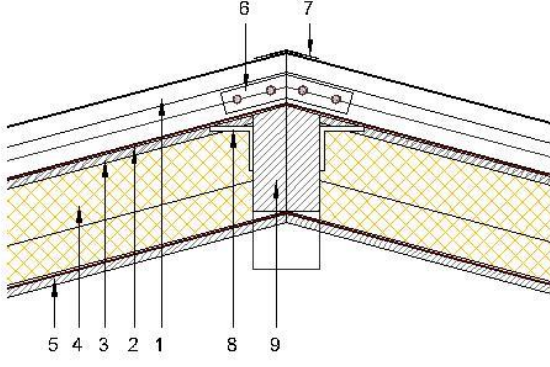
Tipo de encuentro	Detalle	Descripción
Cubierta y fachada hastial (cerramiento opaco)		<p>La proyección de la cubierta de paneles tipo cassette crea un alero que se cubre por la cara interior con un tablero de madera cemento. Asimismo, este alero remata en un perfil U de aluminio.</p>
Cubierta y fachada hastial (carpintería)		<p>Además del alero visto en el detalle anterior, la carpintería puede complementarse con dispositivos de protección solar que, al igual que el balcón, se sujetan de la estructura de paneles de aluminio.</p>
Cubierta y muro portante		<p>En este encuentro, la totalidad de la capacidad portante recae en los paneles de aluminio extruido. De esta manera, no existe interrupción del aislamiento térmico. A su vez, existe continuidad de la lámina impermeable del exterior y de la barrera de vapor del interior.</p>
Cumbrera		<p>Se utiliza una viga de madera laminada como elemento de unión de ambos faldones. Los paneles de aluminio, a su vez, se sujetan entre sí mediante pletinas, al igual que lo hacen los de cubierta con los de muro portante. La conexión entre paneles y viga se realiza mediante ángulos metálicos.</p>

Tabla 9. Encuentros con cubierta. Fuente: elaboración propia en base a Víctor Hermo Sánchez.

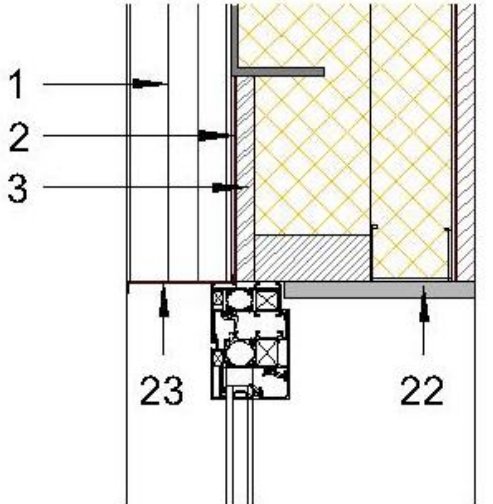
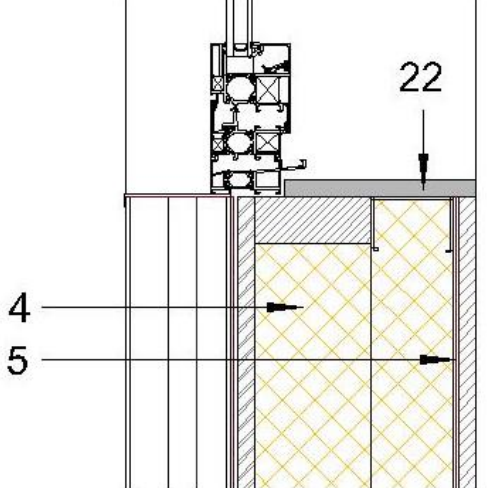
Tipo de encuentro	Detalle	Descripción
Carpintería y muro portante (dintel)		<p>El plano de contacto entre los paneles de aluminio y la carpintería se cierra con un recercado de chapa plegada lacada. Por otro lado, la terminación del hueco por el interior se realiza con un tablero de madera cemento.</p>
Carpintería y muro portante (alféizar)		<p>El plano de contacto entre los paneles de aluminio y la carpintería se cierra con un recercado de chapa plegada lacada. Por otro lado, la terminación del hueco por el interior se realiza con un tablero de madera cemento.</p>

Tabla 10. Encuentros con carpintería. Fuente: elaboración propia en base a Víctor Hermo Sánchez.

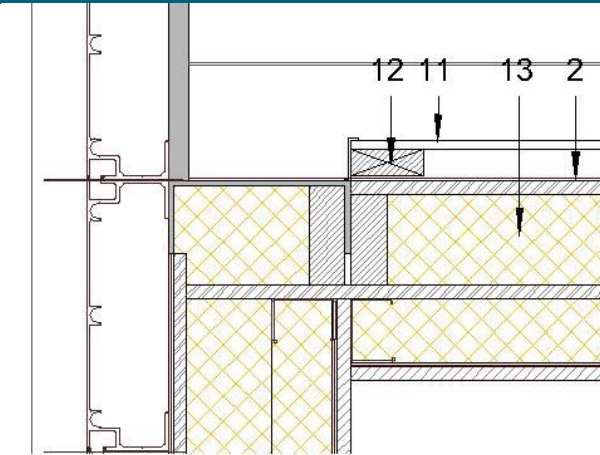
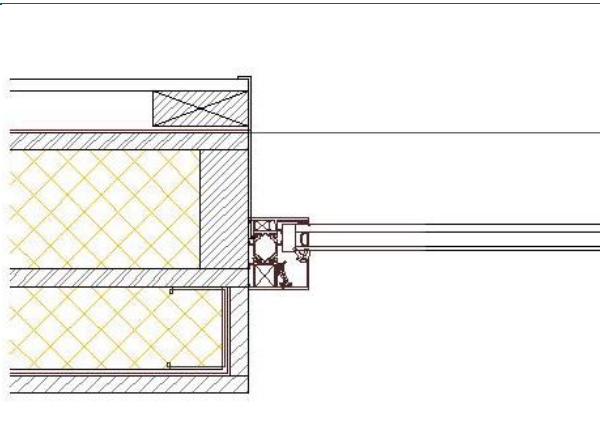
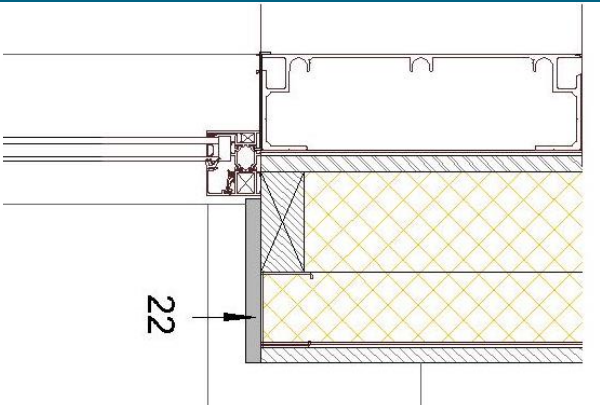
Tipo de encuentro	Detalle	Descripción
Fachada hastial y muro portante		<p>Se observa la estructura de rastreles de madera de la fachada ventilada, como así también uno de los perfiles C verticales de aluminio que conforman el marco rigidizador de la fachada hastial.</p>
Carpintería y fachada hastial (jamba)		<p>En fachada hastial, el marco de la carpintería se apoya en la estructura de rastreles de madera del trasdosado. Al igual que en dintel y alféizar de muro portante, se utiliza una chapa plegada como cierre entre el marco de la carpintería y la cara ventilada de la fachada.</p>
Carpintería y muro portante (jamba)		<p>Al no existir una estructura en el trasdosado como en la fachada hastial, se dispone de un rastrel de madera a manera de premarco sobre el que se colocan la carpintería y el tablero de acabado de madera cemento.</p>

Tabla 11. Encuentros en planta. Fuente: elaboración propia en base a Víctor Hermo Sánchez.

Parte III

Desarrollo y resultados

9. Parámetros de simulación
10. Cálculo y simulación del sistema constructivo
11. Comparación de resultados parciales con el estándar Passivhaus
12. Modificación del sistema constructivo
13. Cálculo y simulación del sistema constructivo modificado
14. Comparación de resultados finales con el estándar Passivhaus



9. Parámetros de simulación

Siguiendo lo planteado en los fundamentos teóricos y lo indicado en el estándar Passivhaus, el análisis del flujo de calor se debe realizar mediante ordenador. A fin de cumplir con los objetivos planteados en esta investigación, se utiliza la **versión 1.10 del software de simulación bidimensional HTflux**. Se trata de un programa desarrollado por HTflux Engineering GmbH en Austria, validado de acuerdo con las normas EN-ISO 10077-2 y EN-ISO 10211.¹ En ese sentido, su aplicación en este estudio es pertinente, ya que el estándar Passivhaus para componentes indica que los valores de transmitancia térmica U , transmitancia térmica lineal Ψ y factor de temperatura f_{Rsi} deben calcularse de acuerdo a la norma ISO 10211. Por lo tanto, HTflux resulta un software válido para realizar la simulación objeto de esta investigación.

Asimismo, HTflux incorpora algoritmos para la realización de cálculos de riesgos de condensación intersticial según el Método Glaser, indicado en la norma ISO 13788, conforme a la cual se deben verificar los riesgos de condensación intersticial en el estándar Passivhaus. De esta manera, al utilizar HTflux se asegura seguir el procedimiento indicado por el Passivhaus Institut.

9.1. Condiciones de simulación

Al momento de la carga de datos y configuración de las condiciones de simulación en HTflux, se deben tener en cuenta determinados parámetros, que se mencionan a continuación.

Planos de corte de los encuentros

Al realizar el cálculo del flujo de calor bidimensional, la norma ISO 10211 indica que, en general, no es posible modelar un edificio completo utilizando un único modelo geométrico. En la mayoría de los casos, el edificio puede compartimentarse en varias partes (incluyendo el terreno) utilizando **planos de corte**.² Estos planos de corte deben ubicarse a una distancia mínima del elemento central (el punto de convergencia entre dos componentes o cerramientos) para que no existan diferencias entre el cálculo del edificio compartimentado y el cálculo del edificio como conjunto.

Asimismo, la norma ISO 10211 establece que esa distancia d_{\min} debe poseer un valor igual a 1 metro o a tres veces el espesor del elemento de flanco, el que sea mayor. La Figura 43 esquematiza estas indicaciones.

¹ HTflux Engineering GmbH, "HTflux – the smart building physics software", HTflux, consultado el 3 de mayo de 2022, <https://www.htflux.com/en/>

² *Puentes térmicos en edificación. Flujos de calor y temperaturas superficiales. Cálculos detallados*, UNE-EN-ISO 10211 (Madrid: AENOR, 2012), 16.

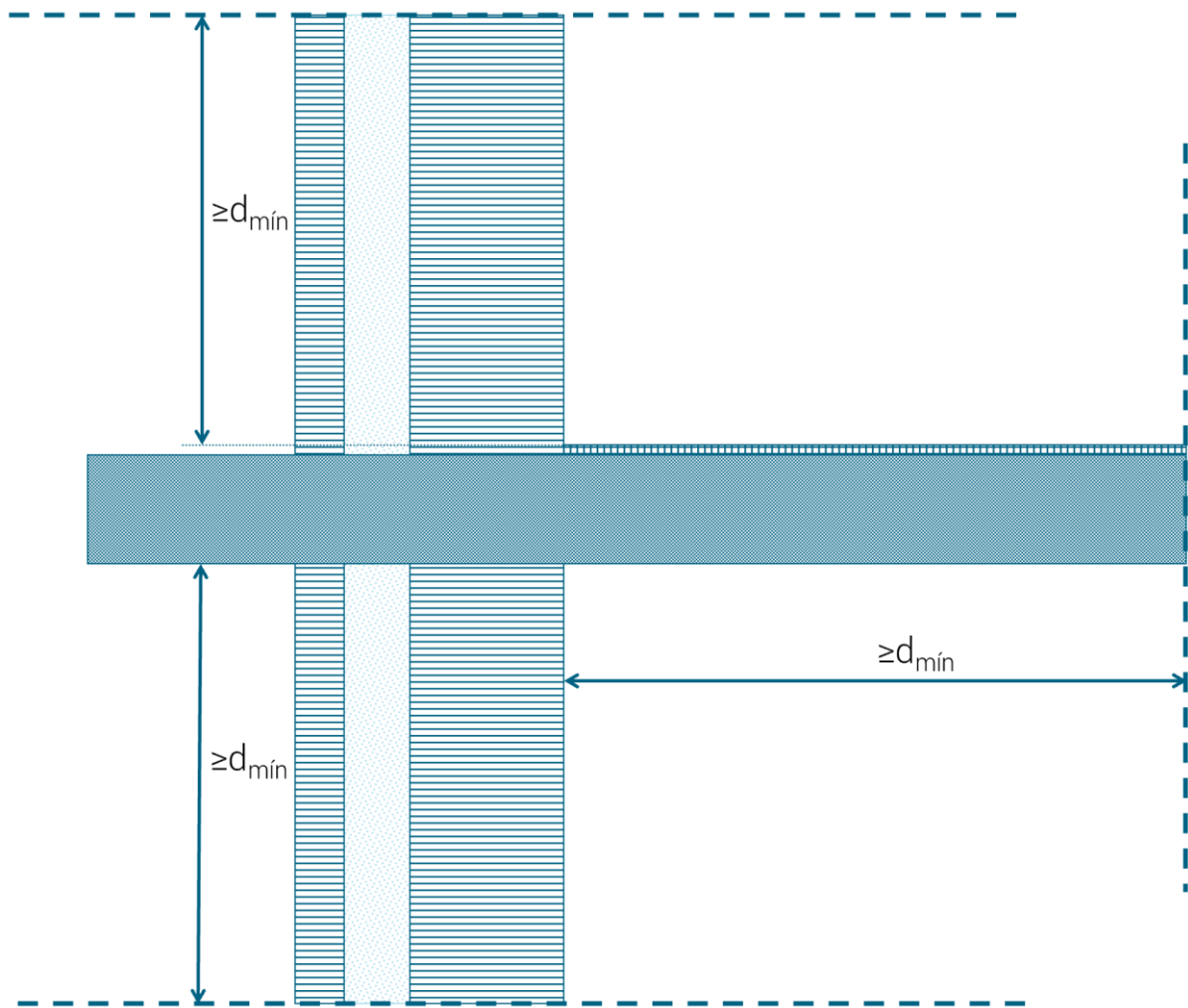


Figura 43. Situación de los planos de corte a una distancia $d_{\text{mín}}$ desde un elemento central en un modelo geométrico bidimensional. Fuente: norma ISO 10211.

Cuando el encuentro bajo análisis incluye el terreno, los planos de corte se establecen en función de la **dimensión característica del suelo B**, definida en la norma ISO 13370. Esta dimensión se define como la relación entre el área del piso y el semiperímetro del piso³. En este trabajo, dado que no se está evaluando un edificio concreto, no existe dimensión característica del suelo definida. Por lo tanto, el flujo de calor en los encuentros que incluyen el terreno se analiza adoptando las distancias mínimas indicadas en la norma. Los planos de corte de esos encuentros se esquematizan en la Figura 44.

³ *Materiales y productos para la edificación. Propiedades higrotérmicas. Valores tabulados de diseño y procedimientos para la determinación de los valores térmicos declarados y de diseño*, UNE-EN-ISO 13370 (Madrid: AENOR, 2017), 24.

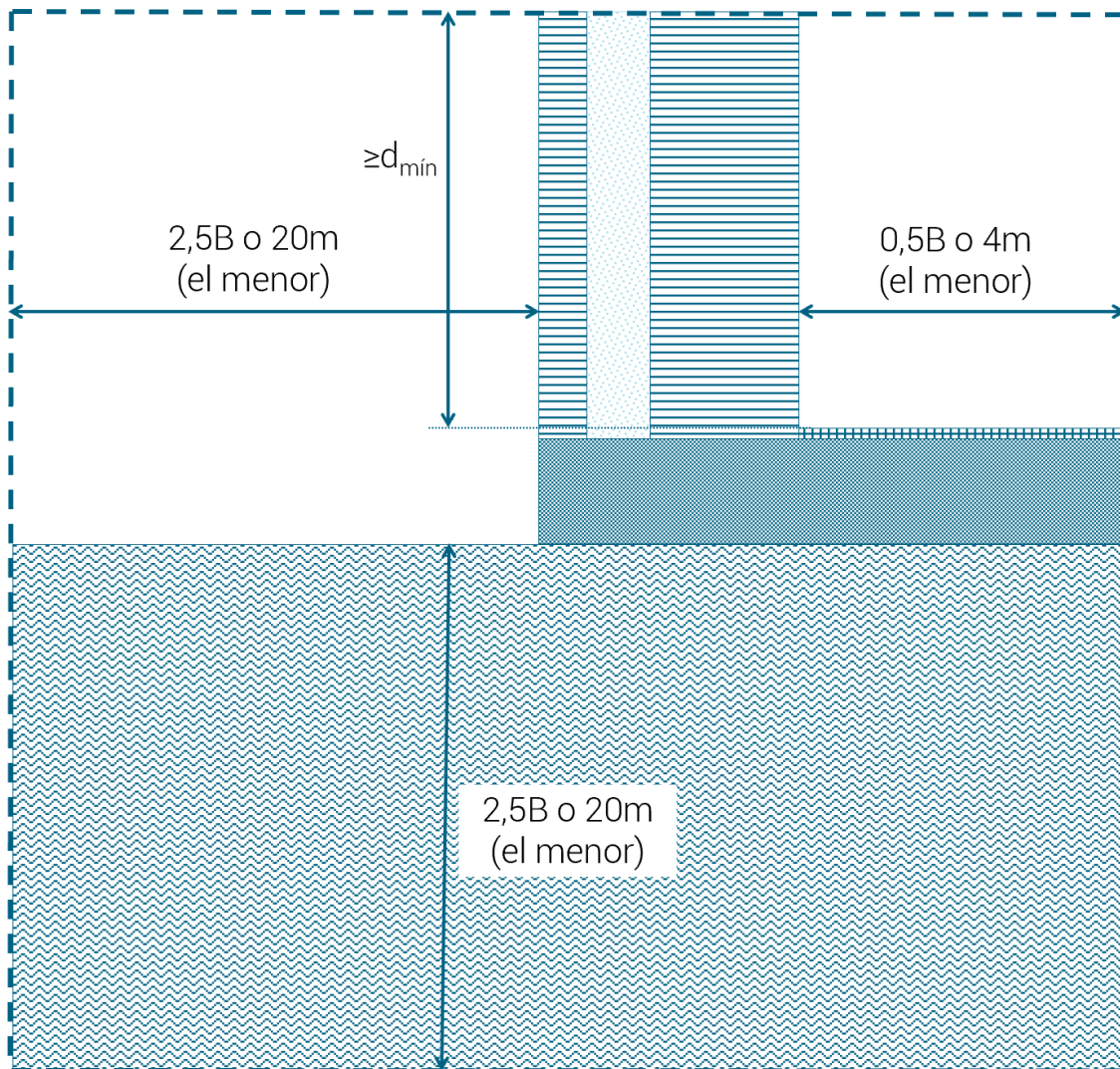


Figura 44. Esquema de los planos de corte para un modelo geométrico bidimensional que incluye el terreno. Fuente: norma ISO 10211.

Temperaturas y resistencias térmicas superficiales interiores y exteriores

Para el cálculo de **flujo de calor** en cerramientos opacos, se adoptan los valores indicados por el estándar para muros y cubiertas ventilados, ya que, como se observó en la descripción de materiales y componentes del capítulo anterior, tanto los muros portantes como la cubierta y las fachadas hastiales son ventilados. Para suelo, se adoptan los valores indicados para suelo en contacto con el terreno.

	R_{si} m ² K/W	R_{se} m ² K/W	T° interior °C	T° exterior °C
Muro ventilado	0,13	0,13	20	-10
Cubierta inclinada ventilada	0,12	0,12		
Carpinterías	0,13	0,04		
Suelo en contacto con terreno	0,17	0,00	-	-

Tabla 12. Condiciones de simulación de flujo de calor. Fuente: elaboración propia en base a Passivhaus Institut.

Dado que se utilizan los valores de resistencia térmica superficial exterior exigidos por el estándar, la simulación de flujo de calor efectuada en este trabajo no tiene en cuenta los posibles efectos de la **emisividad** de los paneles de aluminio extrusionado en la resistencia térmica superficial exterior, cuando incide sobre estos la radiación solar.

Para el cálculo de la **difusión de vapor** y la determinación de los riesgos de condensación intersticial, la norma ISO 13788 indica que "se deben utilizar los valores medios mensuales obtenidos mediante los métodos descritos en la Norma ISO 15927-1 o los incluidos en las normas nacionales".⁴

Se recurre entonces a los archivos climáticos del Código Técnico de la Edificación (CTE) de España, país de origen del sistema. Esta normativa nacional define a una zona climática como aquella para la que se plantean unas solicitaciones exteriores comunes.⁵ Cada zona se identifica mediante una letra de la A a la E (y con la letra griega α para territorios extra peninsulares), correspondiente a la zona climática de invierno, y un número del 1 al 4, correspondiente a la zona climática de verano.

Entonces, la clasificación climática del CTE no es coincidente con la clasificación climática del estándar Passivhaus. Por lo tanto, y teniendo en cuenta que se planteó realizar la evaluación del sistema constructivo para el clima más riguroso de España, se procede a adoptar para el estudio la zona climática E1, ya que es aquella del conjunto que posee las características climáticas más rigurosas. De la lectura del archivo climático de dicha zona, provisto en formato MET como documento de apoyo al Documento Básico HE de Ahorro de Energía del CTE (CTE-DB-HE4),⁶ se obtienen los valores medios mensuales de temperatura y humedad, reflejados en la Tabla 13.

En relación a la temperatura y humedad en el interior, la norma ISO 13788 indica que se utilizan los valores según el uso previsto del edificio. Otra opción, aplicable en viviendas y oficinas, es utilizar las simplificaciones basadas en la temperatura del aire exterior que figuran en el anexo A la norma ISO 13788 (Figura 45).⁷ En esta investigación, se decide optar por este criterio.

A partir de los valores conocidos de temperatura exterior, e interpolando los valores del anexo, se obtienen la temperatura y humedad relativa interior de cada mes (Tabla 13).

⁴ Características higrotérmicas de los elementos y componentes de edificación, 12.

⁵ Dirección General de Arquitectura, Vivienda y Suelo, *Código Técnico de la Edificación. Documento Básico HE: Ahorro de energía*, (Ministerio de Fomento, 2019), <https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/HE/DBHE.pdf>

⁶ Dirección General de Arquitectura, Vivienda y Suelo, *Archivos de datos de todas las zonas climáticas*, consultado el 10 de junio de 2022, https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/HE/CTEdatosMET_20140418.zip

⁷ Características higrotérmicas de los elementos y componentes de edificación, 26.

		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Exterior	T°	2,9	4,2	5,9	7,9	11,7	16,2	19,3	19,3	17,2	11,4	6,1	3,5
	HR	74,8	65,6	62,6	59,3	58,8	50,2	42,6	44,1	52,0	63,5	71,2	74,0
Interior	T°	20,0	20,0	20,0	20,0	20,8	23,1	24,6	24,6	23,6	20,7	20,0	20,0
	HR	47,9	49,2	50,9	52,9	56,7	61,2	64,3	64,3	62,2	56,4	51,1	48,5

Tabla 13. Valores medios mensuales de temperatura y humedad relativa interior y exterior para el cálculo de riesgo de condensación intersticial. Fuente: elaboración propia en base archivo climático de la zona E1 del Código Técnico de la Edificación y norma ISO 13788.

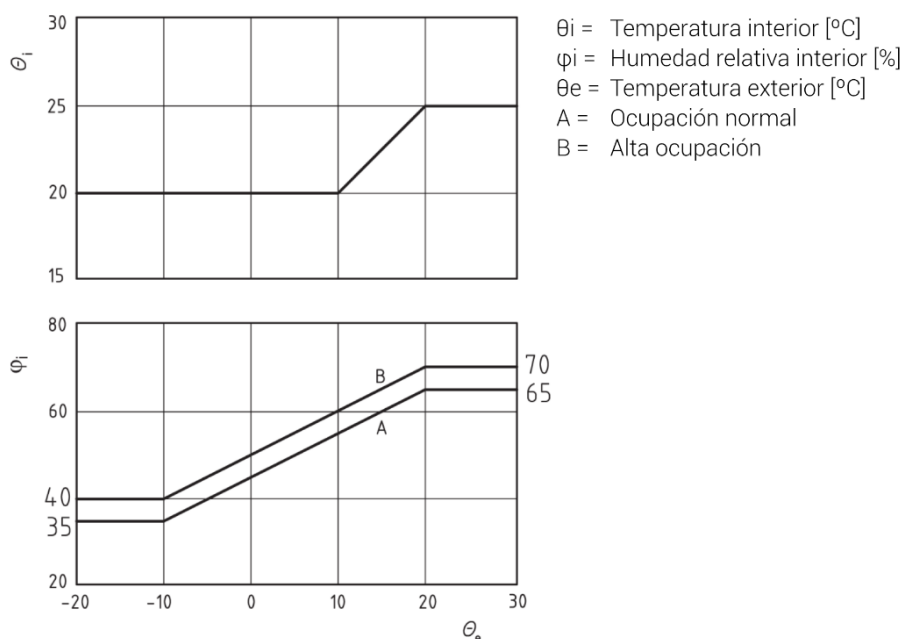


Figura 45. Temperatura media del aire interior y humedad en viviendas y edificios de oficinas, a partir de la temperatura media del aire exterior. Fuente: norma ISO 13788.

Carpintería

Para la simulación del sistema constructivo, se adopta la carpintería de la serie XP 60 TH producida por la empresa Extrugasa, ya que es el modelo utilizado de forma regular en la ejecución de proyectos con este sistema. Las medidas de dicha ventana se corresponden con lo indicado en el estándar (ventana en posición vertical de 1,23 metros de ancho y 1,48 metros de alto). A su vez, sus características técnicas se corresponden con lo estipulado en la memoria de calidades del sistema constructivo (vidrios dobles bajo emisivos con argón). A partir de los resultados del ensayo hecho conforme a la norma ISO 10077-2, indicados en la ficha técnica del modelo de ventana,⁸ sus valores de transmitancia térmica son de 1,1W/m²K para el acristalamiento, y de 1,94W/m²K para el total de la ventana.

Con estos valores de transmitancia térmica, no sería posible alcanzar el valor límite para ventana instalada que exige el estándar Passivhaus. Por tal razón, se asume antes

⁸ Extrugasa, "Ficha técnica: Serie XP-60 TH", consultado el 9 de junio de 2022, <https://www.extrugasa.com/wp-content/uploads/2016/05/ficha-tecnica-XP-60-TH.pdf>

de iniciar el proceso de simulación que el **criterio de confort**, bajo las condiciones actuales en las que se construye con el sistema constructivo objeto de estudio, **no se cumple**. De cualquier manera, la simulación de esos encuentros se lleva a cabo, de manera tal de comprender si es preciso modificar no solo el tipo de carpintería, sino también su ubicación y conexión con los muros.

Finalmente, al momento de simular la ventana seleccionada, se sustituye el acristalamiento por un panel aislante de conductividad térmica igual a $0,035\text{W/mK}$, siguiendo el método presentado en la norma ISO 10077-2 para el cálculo de la transmitancia térmica de marcos de ventana.⁹

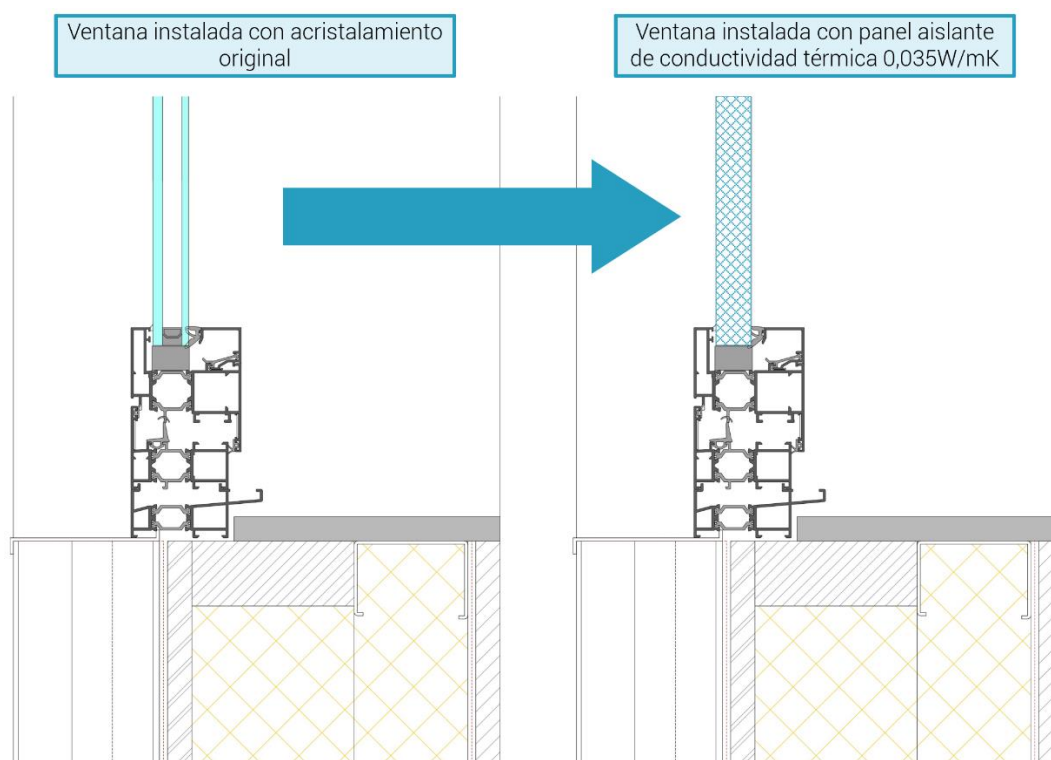


Figura 46. Reemplazo de acristalamiento por panel aislante de $0,035\text{W/mK}$ en encuentro de muro con carpintería. Fuente: elaboración propia en base a Víctor Hermo Sánchez e ISO 10077-2.

Material de acabados

De acuerdo a la norma ISO 6946, cuando existe una cámara de aire ventilada en un cerramiento, en el cálculo de la resistencia térmica total se ignora la resistencia térmica de la cámara de aire y la del resto de las capas entre la cámara de aire y el ambiente exterior.¹⁰ Por lo tanto, no es necesario definir un tipo de acabado exterior para la simulación, ya que este no es considerado en el cálculo de la transmitancia térmica. En cuanto a los acabados interiores de muros y techos, se adoptan dobles placas de yeso

⁹ *Comportamiento térmico de ventanas, puertas y persianas. Cálculo de la transmitancia térmica. Parte 2: Método numérico para los marcos*, UNE-EN-ISO 10077-2 (Madrid: AENOR, 2020), 15.

¹⁰ *Componentes y elementos para la edificación. Resistencia térmica y transmitancia térmica. Método de cálculo*, UNE-EN-ISO 6946 (Madrid: AENOR, 2021), 28.

laminado en muros y tablero de OSB en techos. Como terminación de pavimentos, se adopta tarima flotante.

Coeficiente de conductividad térmica y factor de resistencia al vapor de agua

El estándar Passivhaus indica que se deben utilizar los valores nominales. La Tabla 14 presenta los valores térmicos de diseño de los materiales utilizados en el sistema constructivo, de acuerdo a la norma ISO 10456. A efectos de la simulación, se toman de la base de datos de HTflux los materiales utilizados, y se editan sus propiedades para compatibilizarlas con los valores normados, en tanto sea necesario. En el caso del material a utilizar como barrera de vapor, se adopta la lámina de polietileno de 0,25 milímetros indicada en la ISO 10456, cuyo espesor de cámara capa de aire equivalente (espesor de una capa de aire inmóvil con la misma resistencia al vapor de agua que el producto)¹¹ es igual a un factor de resistencia al vapor de agua de 400.000.

Grupo de materiales o aplicación		Densidad ρ kg/m ³	Conduc. térmica λ W/mK	Capacidad calorífica c_p J/kgK	Factor de resistencia al vapor de agua	
					seco μ	húmedo
Metales	Aluminio	2800	160	880	∞	∞
	Acero	7800	50	450	∞	∞
Hormigón	Armado	2400	2,5	1000	130	80
Mortero	Cemento y arena	1800	1	1000	10	6
Plásticos sólidos	Poliamida	1150	0,25	1600	50000	5000
Gomas	EPDM	1150	0,25	1000	6000	6000
Materiales sellantes	Espuma elastomérica flexible	70	0,05	1500	10000	10000
	Espuma de poliuretano	70	0,05	1500	60	60
	Espuma de polietileno	70	0,05	2300	100	100
Yeso	Placa de yeso laminado	700	0,21	1000	10	4
Suelos	Arena y grava	2200	2	1180	50	50
Madera	Blanda	450	0,12	1600	50	20
	Dura	700	0,18	1600	200	50
Paneles de madera	Laminada	500	0,13	1600	200	70
	Madera-cemento	1200	0,23	1500	50	30
	OSB	650	0,13	1700	50	30
Aislante	Lana mineral (manta)	50	0,035	1030	1	1
	Poliestireno extruido	35	0,035	1450	150	150

Tabla 14. Valores térmicos de diseño de materiales utilizados en el sistema constructivo. Fuente: ISO 10456.

¹¹ Propiedades higrótérmicas. Valores tabulados de diseño, 22.

Además, el estándar indica que la transmitancia térmica U calculada debe corresponder con un **área representativa** del componente opaco. En ese sentido, se debe tener en cuenta que la capa de aislamiento térmico en fachadas hastiales es interrumpida cada 60 centímetros por el rastrelado de madera que actúa como elemento estructural de dicho cerramiento. Por lo tanto, la fachada hastial se constituye como un **cerramiento heterogéneo**, y su transmitancia térmica no será homogénea en toda su superficie.

Para determinar la transmitancia térmica representativa del componente, es preciso introducir en el software de simulación un material en la capa heterogénea, cuya resistencia térmica equivalga a la resistencia térmica media ponderada entre el aislamiento térmico y el rastrelado de madera. La Figura 47 indica el valor de conductividad térmica a adoptar, en función de la proporción de cada material en un metro cuadrado.

Proporción de cada material en 1m²

$$\text{Rastrelado} = 0,035\text{m} \times 1 \times 2 = 0,07\text{m}^2$$

$$\text{Lana mineral} = 0,93\text{m}^2$$

Resistencia térmica de cada material

$$R_{\text{rastrelado}} = 0,1\text{m} / 0,12\text{W/mK} = 0,83\text{m}^2\text{K/W}$$

$$R_{\text{lana mineral}} = 0,1\text{m} / 0,035\text{W/mK} = 2,85\text{m}^2\text{K/W}$$

Resistencia térmica ponderada

$$R = \frac{0,83\text{m}^2\text{K/W} \times 0,07 + 2,85\text{m}^2\text{K/W} \times 0,93}{0,07 + 0,93}$$

$$R = 2,70\text{m}^2\text{K/W} \gg \lambda = 0,10\text{m} / 2,70\text{m}^2\text{K/W}$$

$$\lambda = 0,037\text{W/mK} \gg \text{A adoptar en simulación}$$

Rastrelado de madera 100×35mm

Lana mineral 100mm

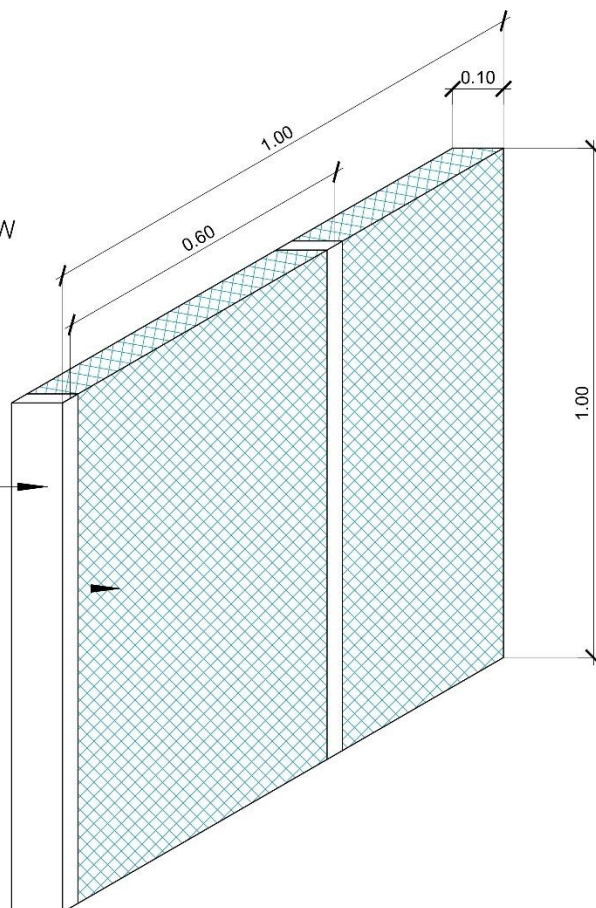


Figura 47. Determinación de la resistencia térmica representativa de la capa heterogénea de la fachada hastial. Fuente: elaboración propia

La capa superior de aislamiento térmico de la solera presenta similar heterogeneidad: las placas de poliestireno extruido se ven interrumpidas por un rastrelado de madera cada 60 centímetros. En este caso, las conductividades térmicas de los materiales son iguales a las vistas en la fachada hastial y el espesor de la capa es de 7,8 centímetros. La conductividad térmica equivalente también resulta igual a 0,037W/mK.

9.2. Determinación de detalles constructivos evaluables

El tipo y cantidad de detalles evaluables surge de cruzar la información disponible sobre los encuentros que el sistema constructivo puede resolver a nivel general, y los exigidos por el estándar Passivhaus para certificar sistemas constructivos. La Figura 48 presenta las conexiones entre componentes que dan como resultado grupos de detalles evaluables. La Tabla 15 los enlista y les asigna la nomenclatura correspondiente. A efectos de presentar los resultados de las simulaciones, los subcapítulos siguientes se estructuran en torno a estos grupos.

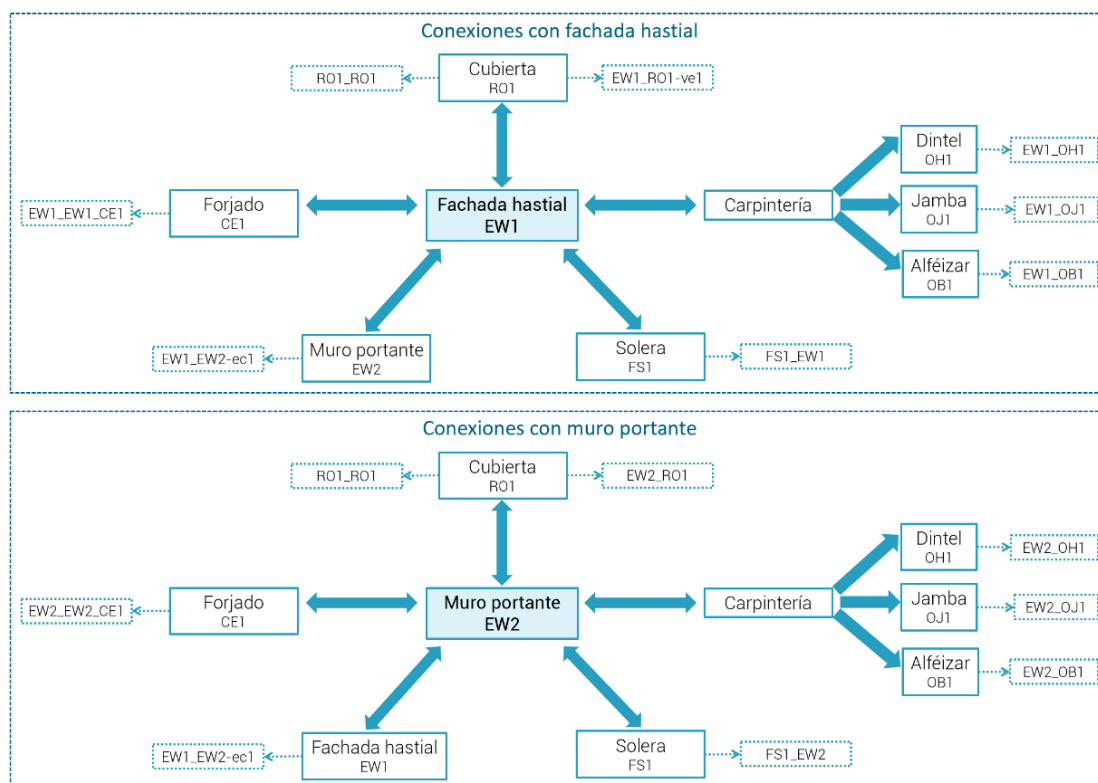


Figura 48. Conexiones entre componentes que dan como resultado encuentros evaluables. Fuente: elaboración propia.

Grupo	Nº	Nomenclatura	Encuentro
Muro-Muro	1	EW1_EW2-ec1	Fachada hastial – Muro portante
Muro-Solera	2	FS1_EW1	Fachada hastial – Solera
	3	FS1_EW2	Muro portante – Solera
Muro-Forjado	4	EW1_EW1_CE1	Fachada hastial – Forjado
	5	EW2_EW2_CE1	Muro portante – Forjado
Muro-Carpintería	6	EW1_OH1	Fachada hastial – Dintel
	7	EW1_OB1	Fachada hastial – Alféizar
	8	EW1_OJ1	Fachada hastial – Jamba
	9	EW2_OH1	Muro portante – Dintel
	10	EW2_OB1	Muro portante – Alféizar
	11	EW2_OJ1	Muro portante – Jamba
Muro-Cubierta	12	EW1_R01-ve1	Fachada hastial – Cubierta
	13	EW2_R01	Muro portante – Cubierta
Cubierta-Cubierta	14	R01_R01	Cumbrera

Tabla 16. Encuentros evaluables mediante software HTflux. Fuente: elaboración propia.

9.3. Etapas del proceso de simulación

Definidos los catorce encuentros evaluables, el dibujo en dos dimensiones de cada uno de ellos se compatibiliza con el formato de archivo de dibujo que soporta el software de simulación. Para que esta compatibilidad ocurra, se llevan a cabo dos acciones:

- **Convertir cada detalle en un conjunto de polilíneas cerradas.** Este paso debe efectuarse para que el programa de simulación reconozca correctamente cada área del detalle y pueda asignarle el material correspondiente. Dentro del conjunto deben incluirse polilíneas que representen el entorno interior y exterior del encuentro.

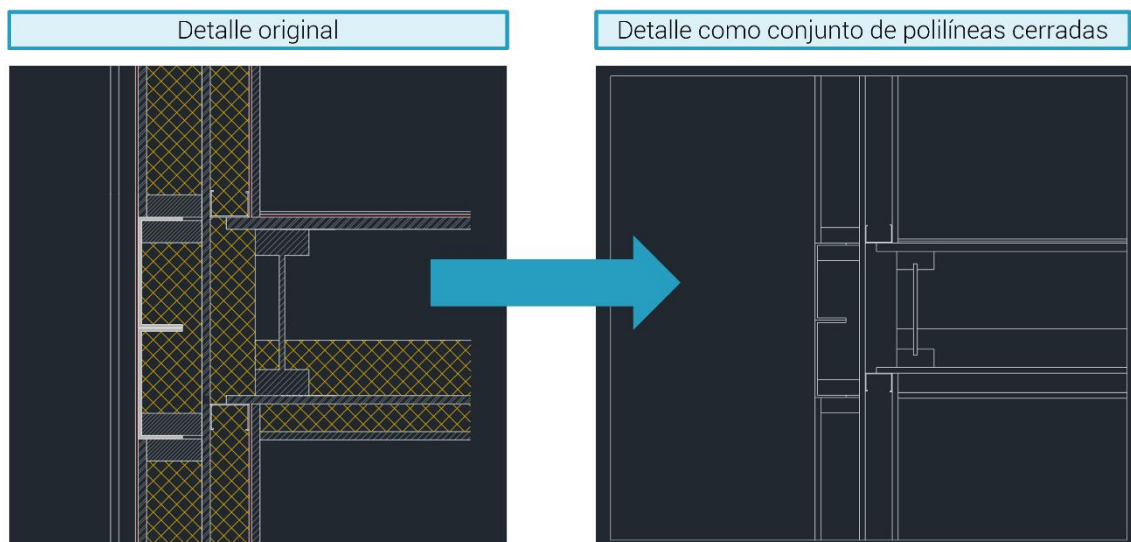


Figura 49. Conversión de detalle a un conjunto de polilíneas cerradas. Fuente: elaboración propia.

- **Convertir el archivo de dibujo de cada detalle al formato DXF (por sus siglas en inglés, *Drawing Exchange Format*).** Este es el formato de archivo para dibujos de diseño asistido por computadora compatible con el programa HTflux.

Obtenidos los catorce archivos DXF, ya es posible cargarlos en el software. Para poder simular el flujo de calor y la difusión de vapor, se deben llevar a cabo las siguientes acciones:

- **Asignar a cada área del dibujo un material.** Se utilizan los materiales de la base de datos generada anteriormente. En el caso de materiales de pequeño espesor, como las barreras de vapor, la polilínea se dibuja directamente en el software y le asigna el material y espesor correspondiente.
- **Asignar las condiciones de simulación interior y exterior.** Las áreas que representan el espacio interior y exterior también se definen con la condición de simulación correspondiente.

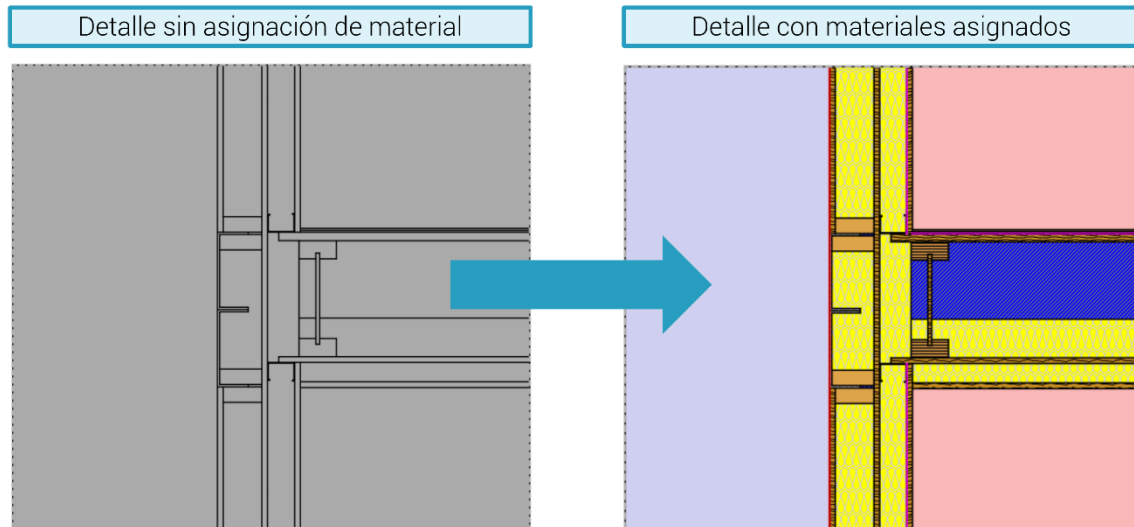


Figura 50. Asignación de materiales en HTflux. Fuente: elaboración propia en base a HTflux.

- **Establecer propiedades de la simulación.** Antes de ejecutar la simulación, es preciso definir su nivel de resolución en milímetros y el criterio de convergencia del cálculo, en función del consumo de memoria del ordenador que conlleva el proceso.
- **Realizar una primera simulación de flujo de calor para verificar la correcta carga de los materiales.** Este paso trae implícita la definición de una "región de simulación", entendida como la parte del detalle a analizar, que puede ser total o parcial. A efectos de este trabajo, interesa analizar la totalidad del detalle, por lo que se acepta la definición por defecto que realiza el programa.

Tras esta simulación inicial, y de no presentarse inconvenientes, es posible volver a simular el flujo de calor y utilizar las **herramientas** que ofrece el software para determinar la **transmitancia térmica U**, la **transmitancia térmica lineal Ψ** o la **transmitancia térmica lineal por el suelo Ψ_g** (a utilizar en encuentros con solera).

Para utilizar la herramienta que permite obtener la **temperatura superficial interior T_{si}** , necesaria para el cálculo del factor de temperatura f_{RSi} , se deben editar las condiciones de simulación, específicamente el valor de la resistencia térmica superficial interior. De igual manera, para la simulación de la difusión de vapor según el Método Glaser y cálculo de la **condensación intersticial**, previamente se deben adecuar las temperaturas y humedades interiores y exteriores. Además, también se deben establecer las propiedades de la simulación (máximo número de iteraciones, aceleración de convergencia y máxima densidad de condensación), tal y como se hiciera en la simulación de flujo de calor.

Para la simulación del flujo de calor de todos los encuentros, a excepción de los encuentros de muros con solera que poseen grandes dimensiones, se adopta una resolución igual a 0,9 milímetros, y un criterio de convergencia preciso (variación de temperatura menor a 0,001K). Para la simulación del flujo de calor de encuentros con solera, se adopta una resolución de 8 milímetros y un criterio de convergencia preciso.

Por otro lado, para la simulación con el método Glaser se adopta un número máximo de 50 iteraciones, una aceleración de convergencia igual a 0 y una máxima densidad de condensación igual a $100.000\text{g/m}^2/\text{d}$. Estos parámetros permiten obtener resultados en menor tiempo a que si se usara un número de iteraciones mayor. La definición de estos parámetros influye en la precisión de los resultados.

De esta manera, es posible obtener los resultados de los catorce detalles evaluables, para contrastarlos luego con cada uno de los criterios que el estándar Passivhaus considera al momento de certificar componentes constructivos. El procedimiento de simulación en su totalidad se resume como lo indica la Figura 51.

En el capítulo siguiente se presentan los resultados de estas simulaciones, estructurados por tipo de detalle y, a su vez, ordenados por el tipo de criterio del estándar Passivhaus: criterio de higiene, criterio de confort, criterios de eficiencia y criterios de humedad.

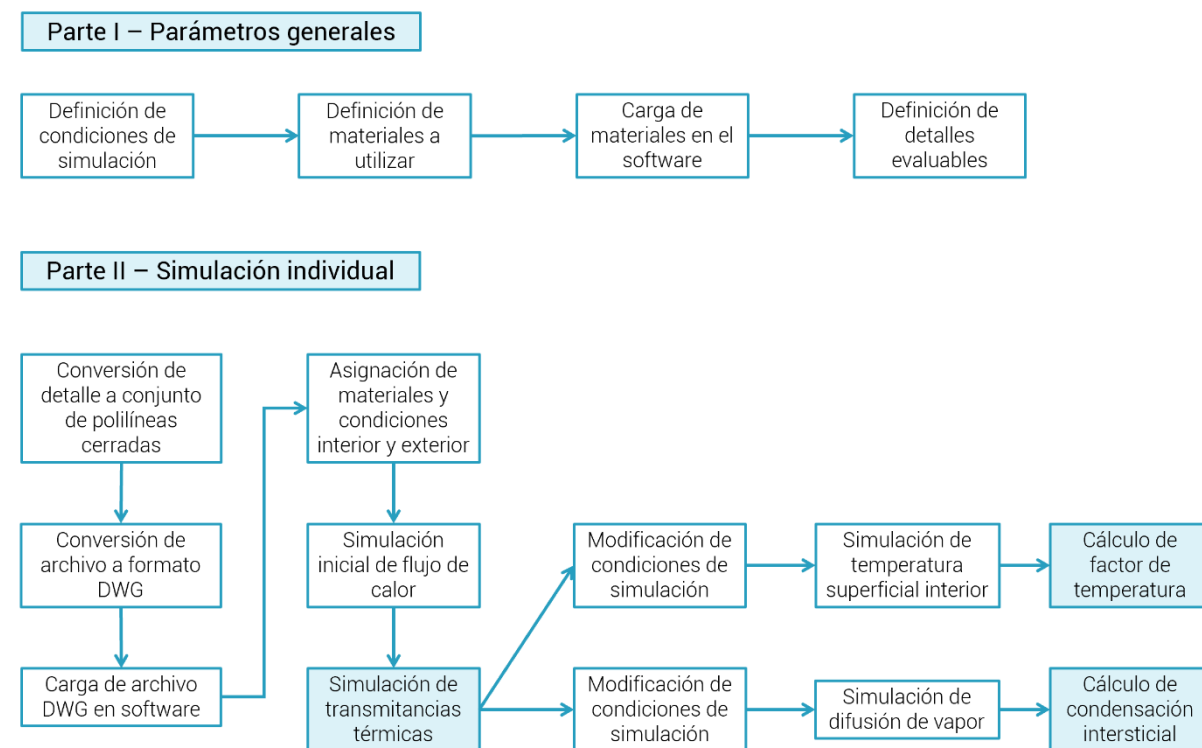


Figura 51. Procedimiento para llevar a cabo la simulación del sistema constructivo. Fuente: elaboración propia.

10. Cálculo y simulación del sistema constructivo

10.1. Encuentro en esquina

EW1_EW2-ec1

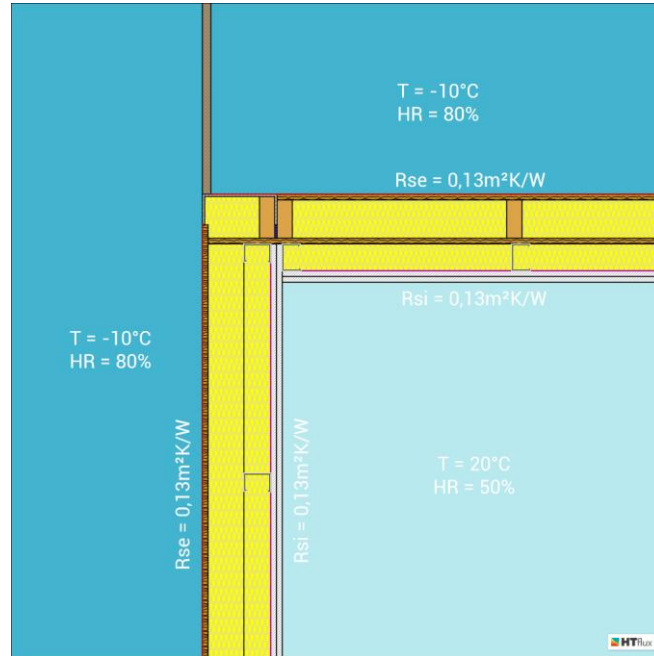


Figura 52. Condiciones de simulación del encuentro EW1_EW2-ec1. Fuente: HTflux.

- **Criterio de higiene.** El punto más frío de este encuentro posee una temperatura de 14,9°C. A partir de este dato, se obtiene el factor de temperatura $f_{R_{si}=0,25m^2K/W}$:

$$f_{R_{si}=0,25m^2K/W} = \frac{T_{si} - T_e}{T_i - T_e} \quad f_{R_{si}=0,25m^2K/W} = \frac{14,9^\circ\text{C} - (-10^\circ\text{C})}{20^\circ\text{C} - (-10^\circ\text{C})} \quad f_{R_{si}=0,25m^2K/W} = 0,83$$

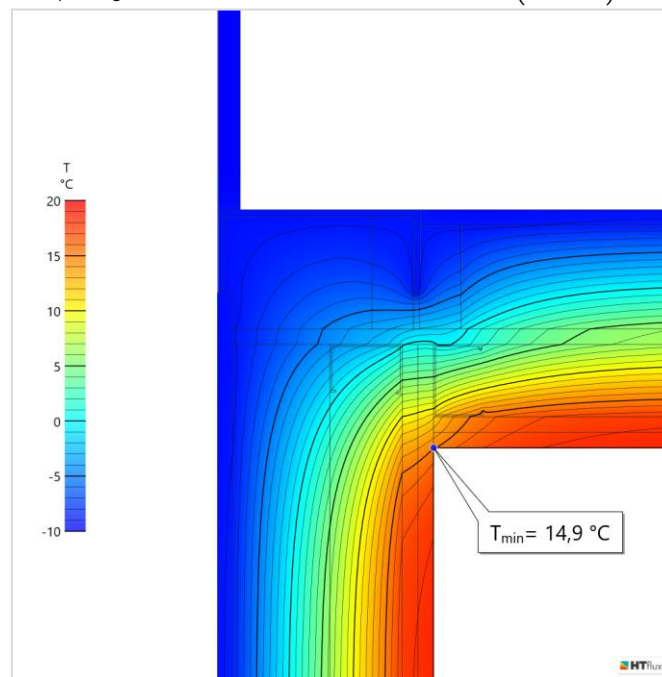


Figura 53. Temperatura superficial interior del encuentro EW1_EW2-ec1. Fuente: HTflux.

- **Criterio de confort.** Dado que es un detalle estrictamente opaco, no existe carpintería en la que verificar el valor de la transmitancia térmica U de la ventana instalada.
- **Criterios de eficiencia.** Se obtiene un valor de transmitancia térmica U de la fachada hastial igual a $0,183\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ en el área homogénea. En el muro portante, se obtiene un valor de U de $0,193\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ en el área homogénea. La transmitancia térmica lineal es igual a $-0,017\text{W}/\text{mK}$. Al tratarse de un encuentro estrictamente opaco, se determina el valor del factor de temperatura, que es igual al calculado en el criterio de higiene, esto es, un factor de temperatura f_{Rsi} de $0,83$.

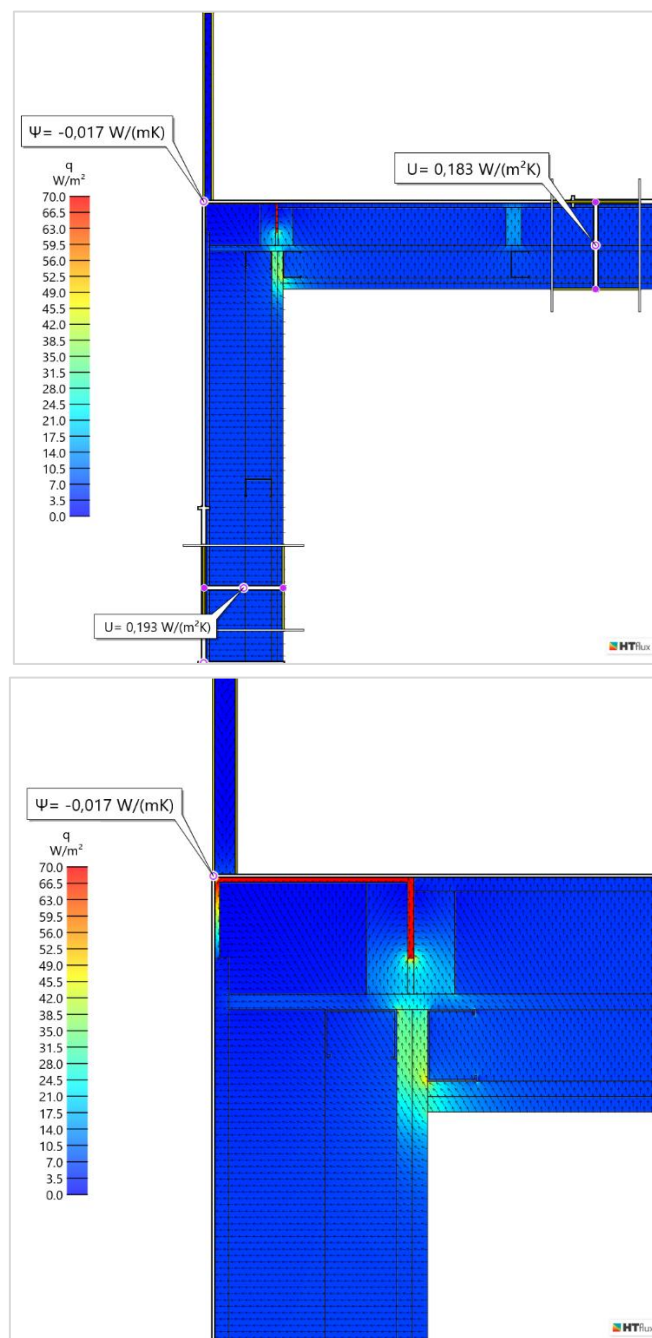


Figura 54. Transmitancias térmicas U y Ψ del encuentro EW1_EW2-ce1. Fuente: HTflux.

- **Criterios de humedad.** Se simula el detalle a partir del mes con condiciones exteriores menos favorables (enero) y por todo un año. No se detecta producción de condensación intersticial en ningún mes del año.

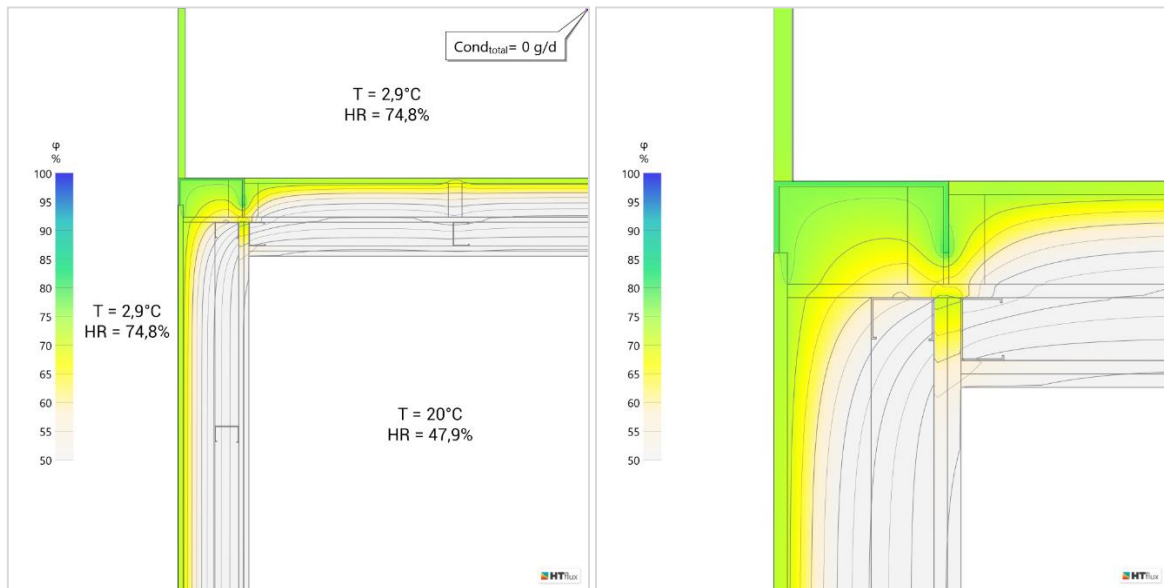


Figura 55. Humedad relativa en mes más desfavorable (enero) del encuentro EW1_EW2-ce1. Fuente: HTflux.

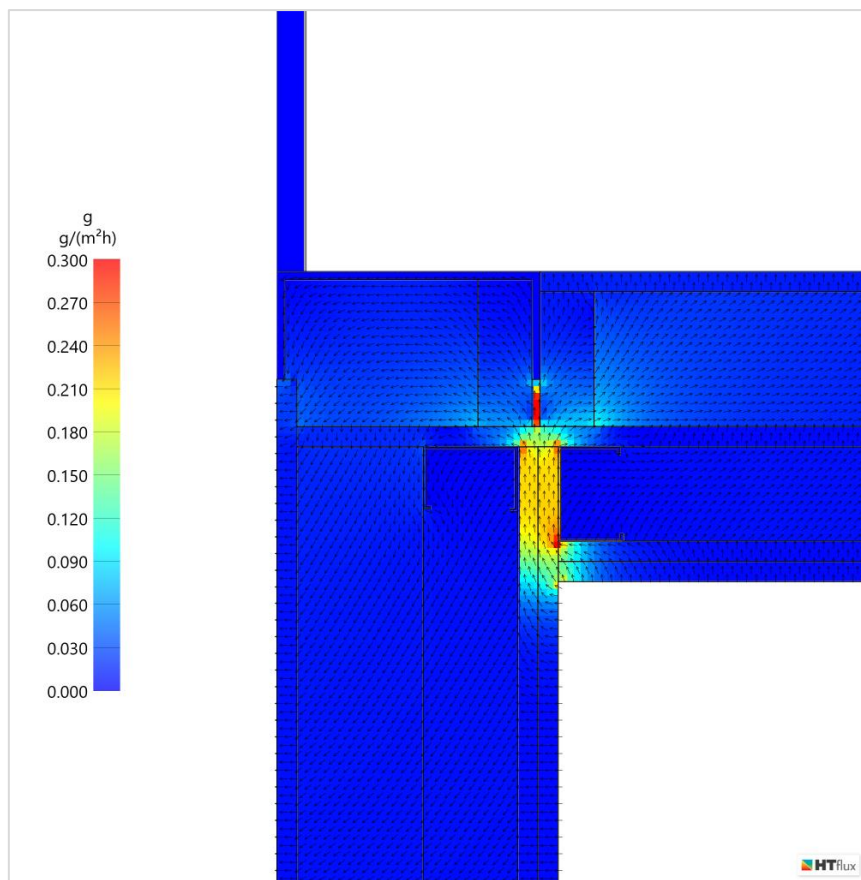


Figura 56. Flujo de vapor en mes más desfavorable (enero) del encuentro EW1_EW2-ce1. Fuente: HTflux.

10.2. Encuentros con solera

FS1_EW1

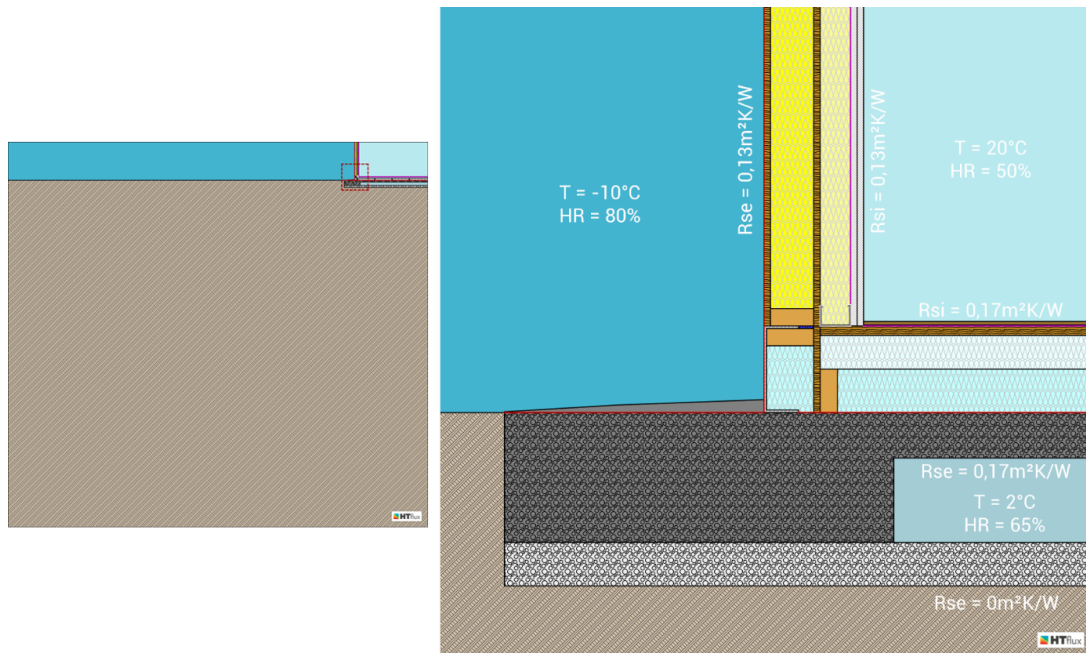


Figura 57. Condiciones de simulación del encuentro FS1_EW1. Fuente: HTflux.

- **Criterio de higiene.** El punto más frío de este encuentro posee una temperatura de 16,2°C. A partir de este dato, se obtiene el factor de temperatura $f_{R_{si}=0,25m^2K/W}$:

$$f_{R_{si}=0,25m^2K/W} = \frac{T_{si} - T_e}{T_i - T_e} \quad f_{R_{si}=0,25m^2K/W} = \frac{16,2^\circ\text{C} - (-10^\circ\text{C})}{20^\circ\text{C} - (-10^\circ\text{C})} \quad f_{R_{si}=0,25m^2K/W} = 0,87$$

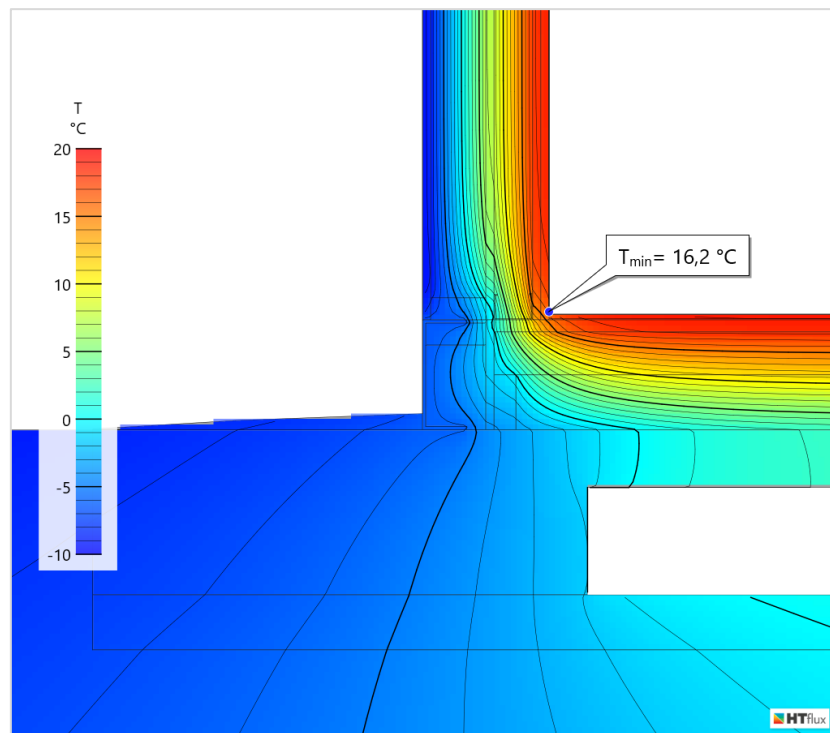


Figura 58. Temperatura superficial interior del encuentro FS1_EW1. Fuente: HTflux.

- **Criterio de confort.** Dado que es un detalle estrictamente opaco, no existe carpintería en la que verificar el valor de la transmitancia térmica U de la ventana instalada.
- **Criterios de eficiencia.** Se obtiene un valor de transmitancia térmica U de la fachada hastial igual a $0,188 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, y un valor de U de $0,180 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ para la solera. El valor de la transmitancia térmica lineal es igual a $-0,043 \text{ W}/(\text{mK})$. Al tratarse de un encuentro estrictamente opaco, se determina el valor del factor de temperatura, que es igual al calculado en el criterio de higiene, esto es, un factor de temperatura f_{Rsi} de $0,87$.

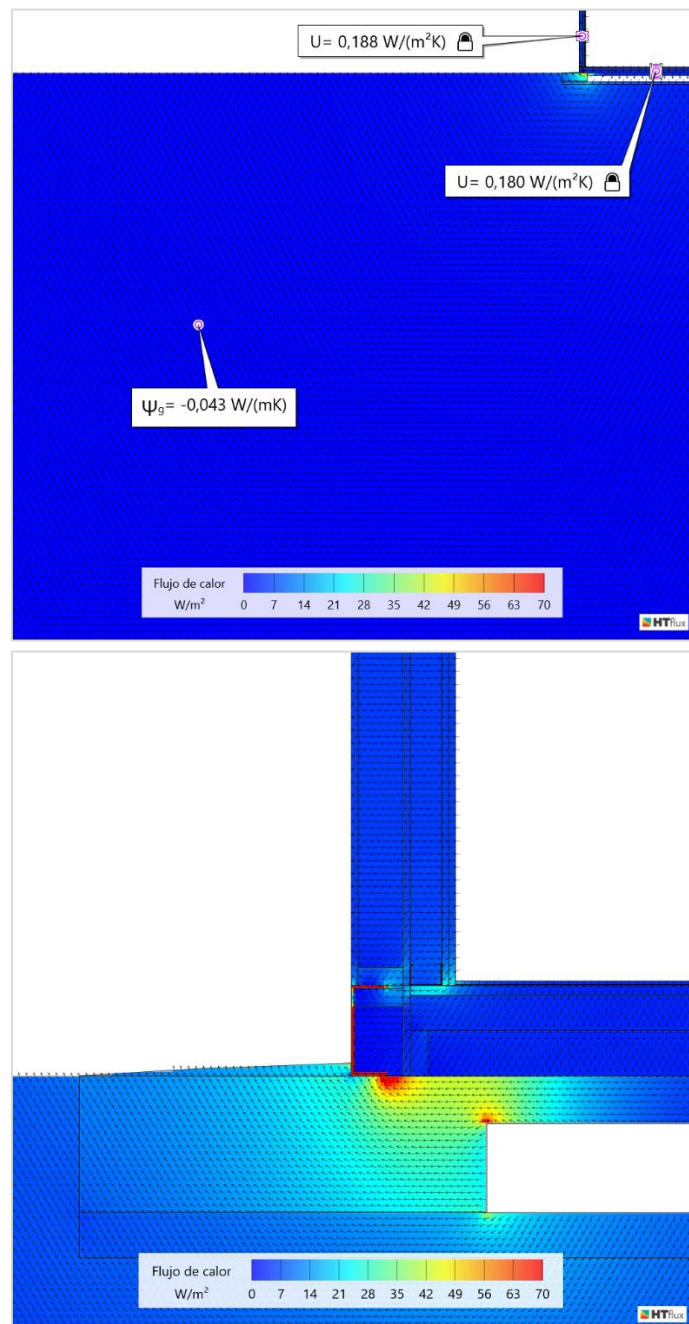


Figura 59. Transmitancias térmicas U y Ψ_g del encuentro FS1_EW1. Fuente: HTflux.

- **Criterios de humedad.** Se simula el detalle a partir del mes con las condiciones exteriores más desfavorable (enero) y por todo un año. No se detecta producción de condensación intersticial en ningún mes del año.

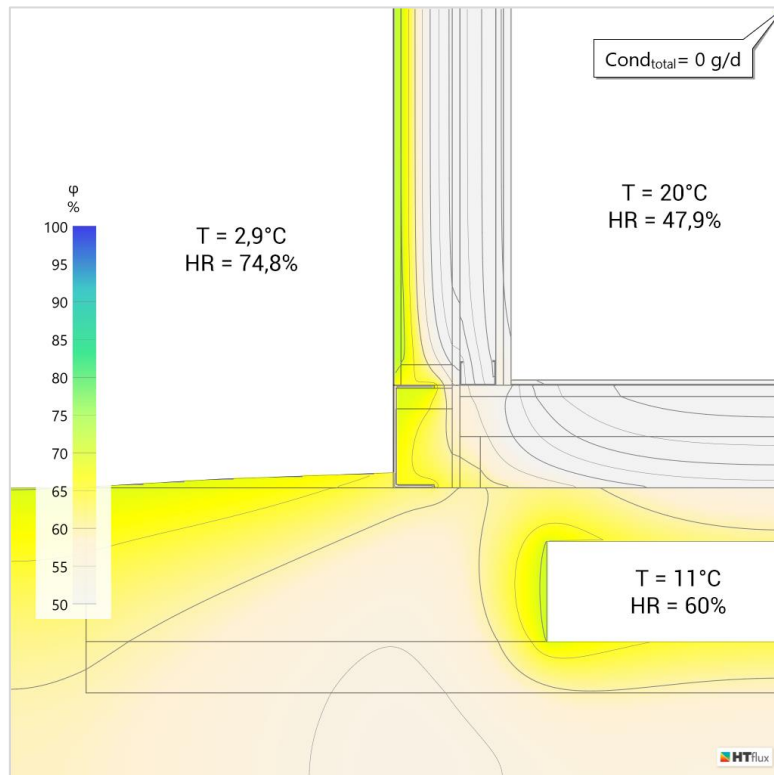


Figura 60. Humedad relativa en mes más desfavorable (enero) del encuentro FS1_EW1. Fuente: HTflux.

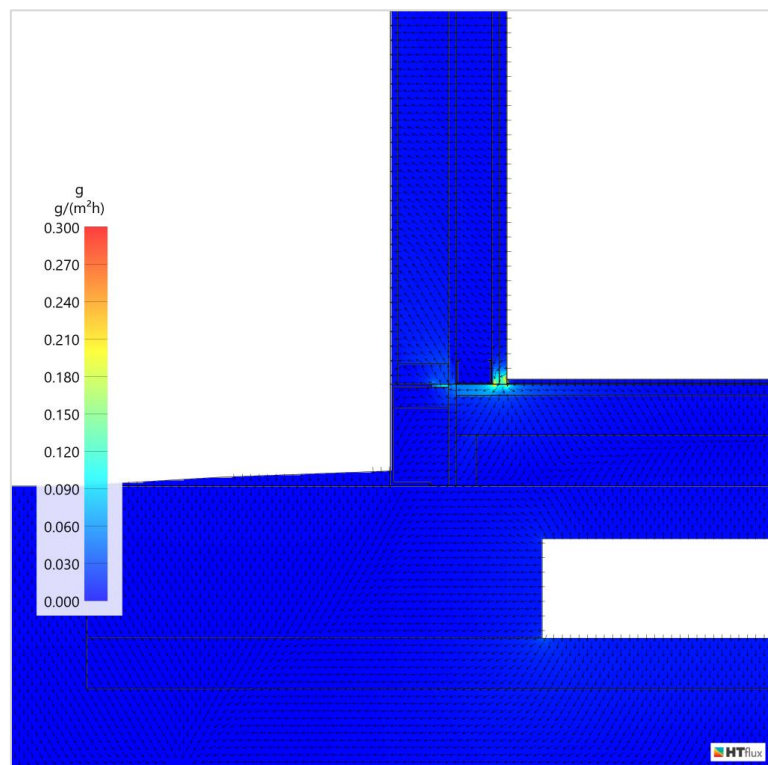


Figura 61. Flujo de vapor en mes más desfavorable (enero) del encuentro FS1_EW1. Fuente: HTflux.

FS1_EW2

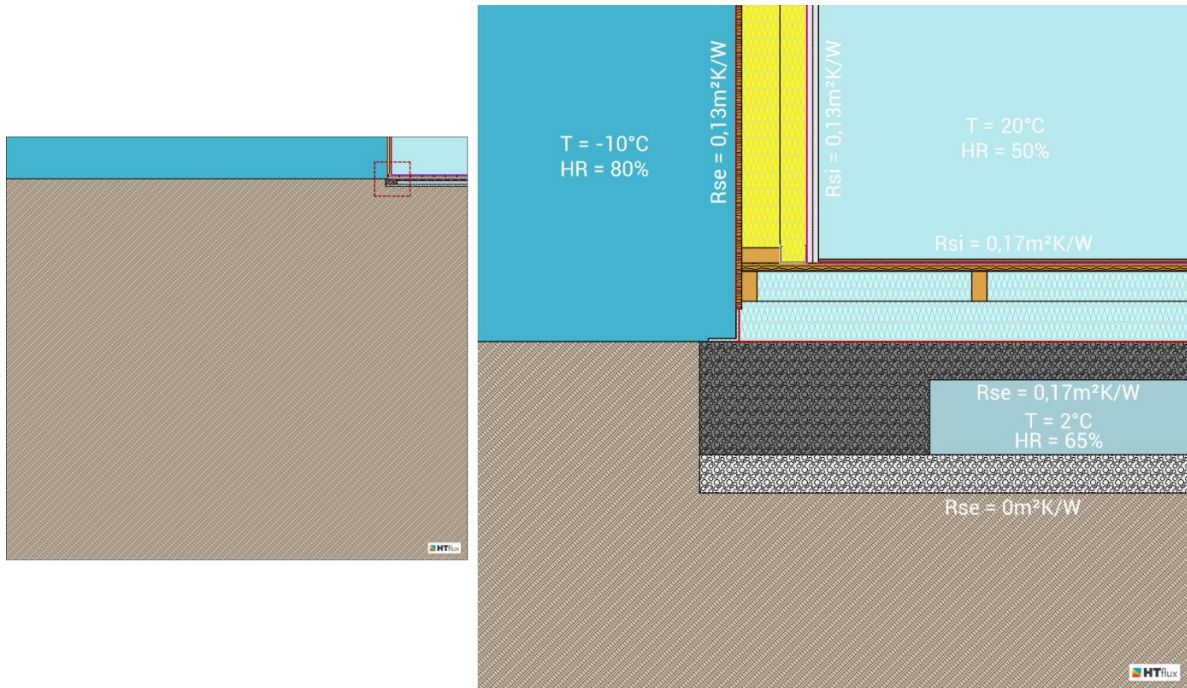


Figura 62. Condiciones de simulación del encuentro FS1_EW2. Fuente: HTflux.

- **Criterio de higiene.** El punto más frío de este encuentro posee una temperatura de 16,3°C. A partir de este dato, se obtiene el factor de temperatura $f_{R_{si}=0,25m^2K/W}$:

$$f_{R_{si}=0,25m^2K/W} = \frac{T_{si} - T_e}{T_i - T_e} \quad f_{R_{si}=0,25m^2K/W} = \frac{16,3^\circ\text{C} - (-10^\circ\text{C})}{20^\circ\text{C} - (-10^\circ\text{C})} \quad f_{R_{si}=0,25m^2K/W} = 0,87$$

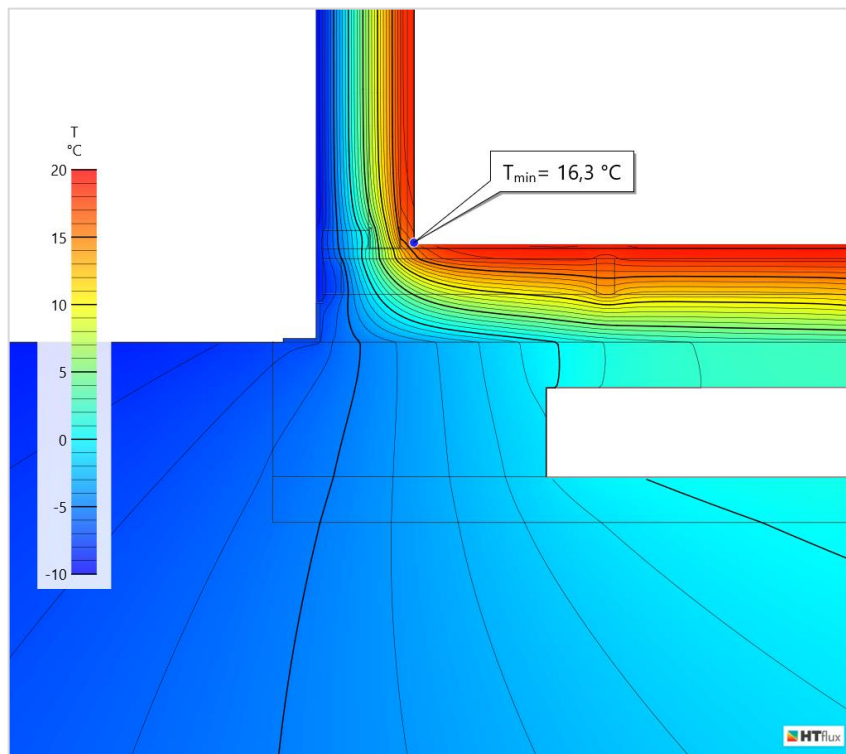


Figura 63. Temperatura superficial interior del encuentro FS1_EW2. Fuente: HTflux.

- **Criterio de confort.** Dado que es un detalle estrictamente opaco, no existe carpintería en la que verificar el valor de la transmitancia térmica U de la ventana instalada.
- **Criterios de eficiencia.** Se obtiene un valor de transmitancia térmica U del muro portante igual a $0,186 \text{ W/m}^2\text{K}$, y un valor de U de $0,173 \text{ W/m}^2\text{K}$ en la solera. La transmitancia térmica lineal es igual a $-0,045 \text{ W/mK}$. Al tratarse de un encuentro estrictamente opaco, también se determina el valor del factor de temperatura, que es igual al calculado en el criterio de higiene, esto es, un factor de temperatura f_{Rsi} de $0,87$.

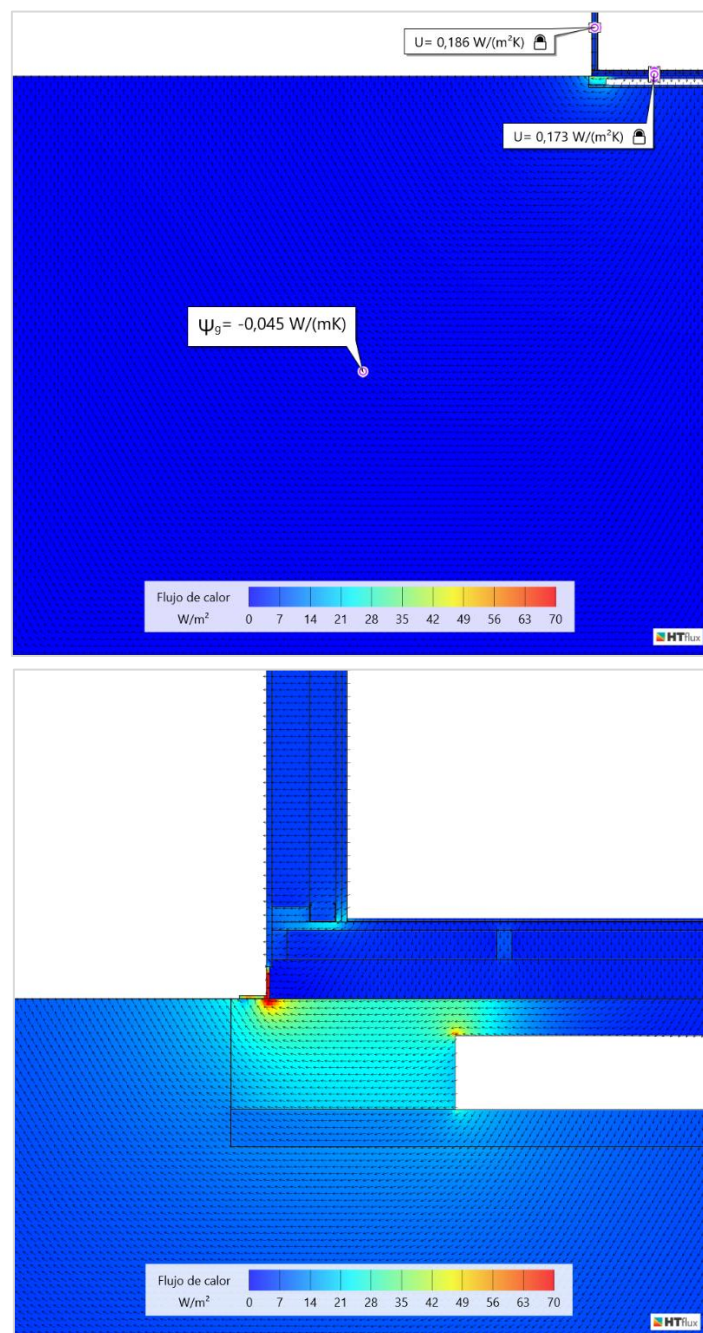


Figura 64. Transmitancias térmicas U y Ψ_g del encuentro FS1_EW2. Fuente: HTflux.

- **Criterios de humedad.** Se simula el detalle a partir del mes con las condiciones exteriores más desfavorable (enero) y por todo un año. No se detecta producción de condensación intersticial en ningún mes del año.

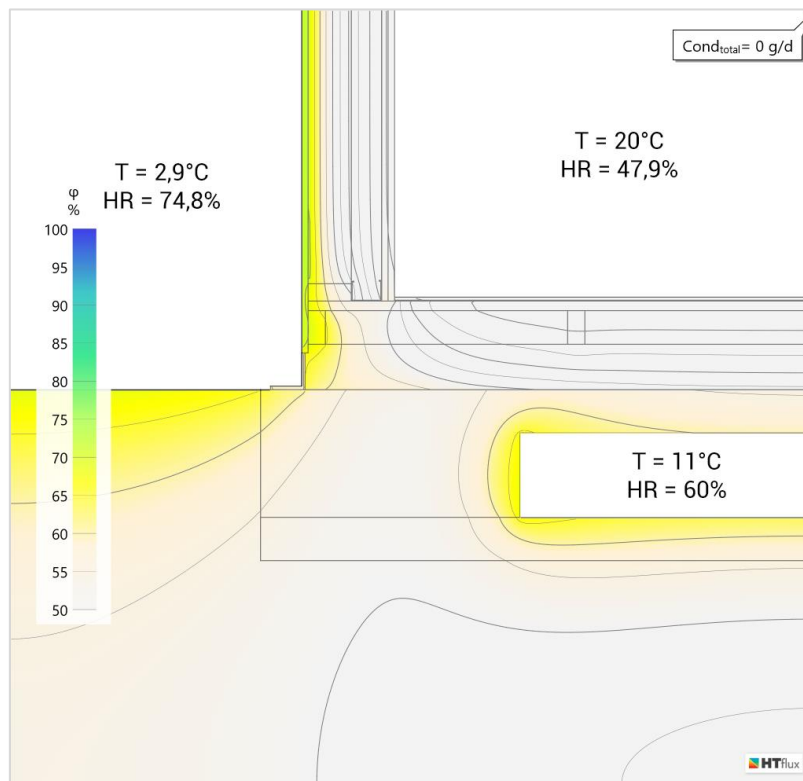


Figura 65. Humedad relativa en mes más desfavorable (enero) del encuentro FS1_EW2. Fuente: HTflux.

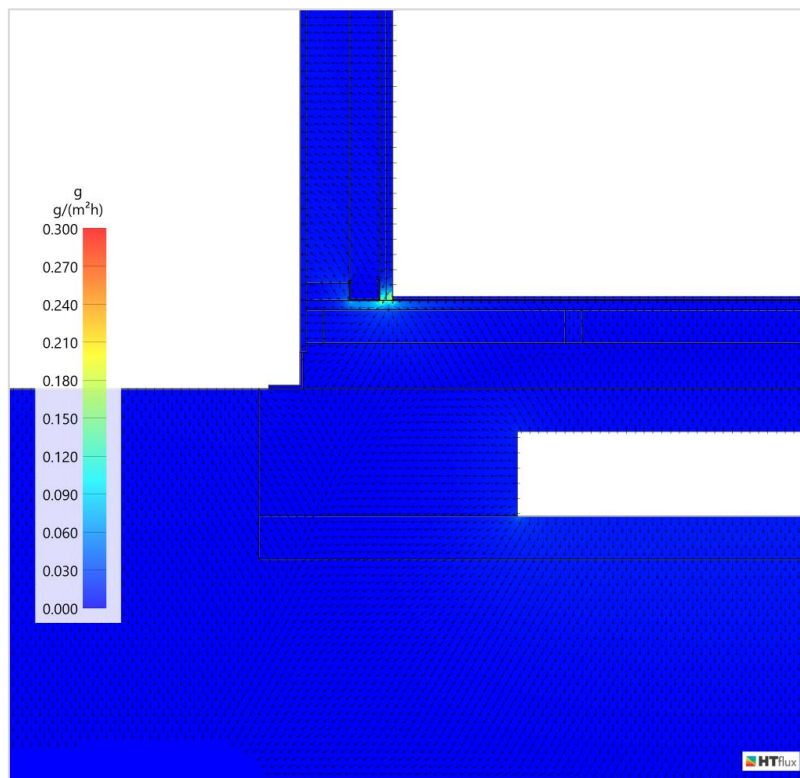


Figura 66. Flujo de vapor en mes más desfavorable (enero) del encuentro FS1_EW2. Fuente: HTflux.

10.3. Encuentros con forjado

EW1_EW1_CE1

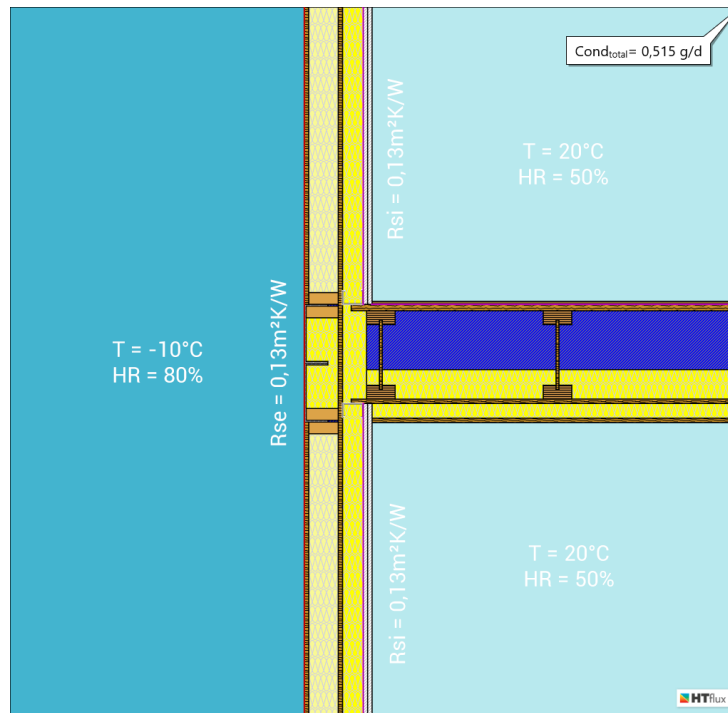


Figura 67. Condiciones de simulación del encuentro EW1_EW1_CE1. Fuente: HTflux.

- **Criterio de higiene.** El punto más frío de este encuentro posee una temperatura de 14,8°C. A partir de este dato, se obtiene el factor de temperatura $f_{R_{si}=0,25m^2K/W}$:

$$f_{R_{si}=0,25m^2K/W} = \frac{T_{si} - T_e}{T_i - T_e} \quad f_{R_{si}=0,25m^2K/W} = \frac{14,8^\circ C - (-10^\circ C)}{20^\circ C - (-10^\circ C)} \quad f_{R_{si}=0,25m^2K/W} = 0,82$$

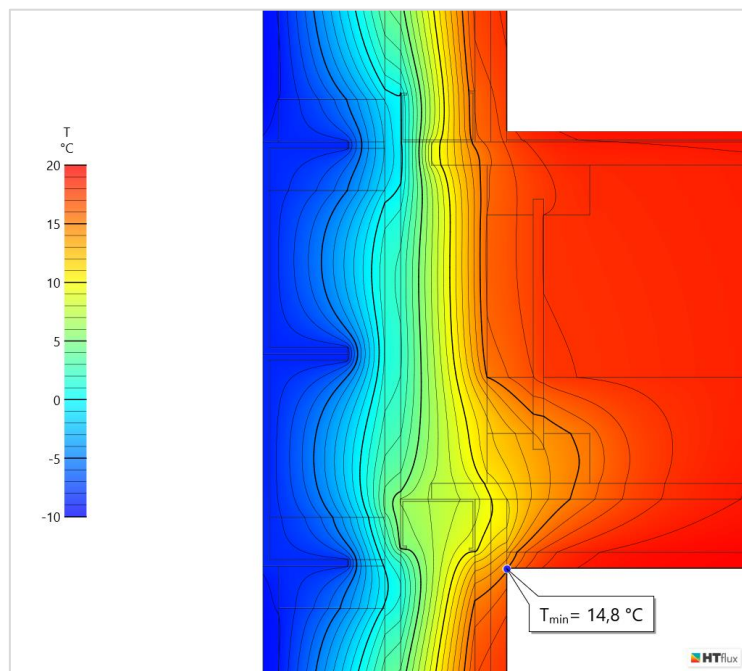


Figura 68. Temperatura superficial interior del encuentro EW1_EW1_CE1. Fuente: HTflux.

- **Criterio de confort.** Dado que es un detalle estrictamente opaco, no existe carpintería en la que verificar el valor de la transmitancia térmica U de la ventana instalada.
- **Criterios de eficiencia.** Se obtiene un valor de transmitancia térmica U de la fachada hastial igual a $0,187\text{W}/\text{m}^2\text{K}$. El valor de la transmitancia térmica lineal es igual a $0,068\text{W}/\text{mK}$. Al tratarse de un encuentro estrictamente opaco, se determina el valor del factor de temperatura, que es igual al calculado en el criterio de higiene, esto es, un factor de temperatura f_{RSi} de $0,82$.

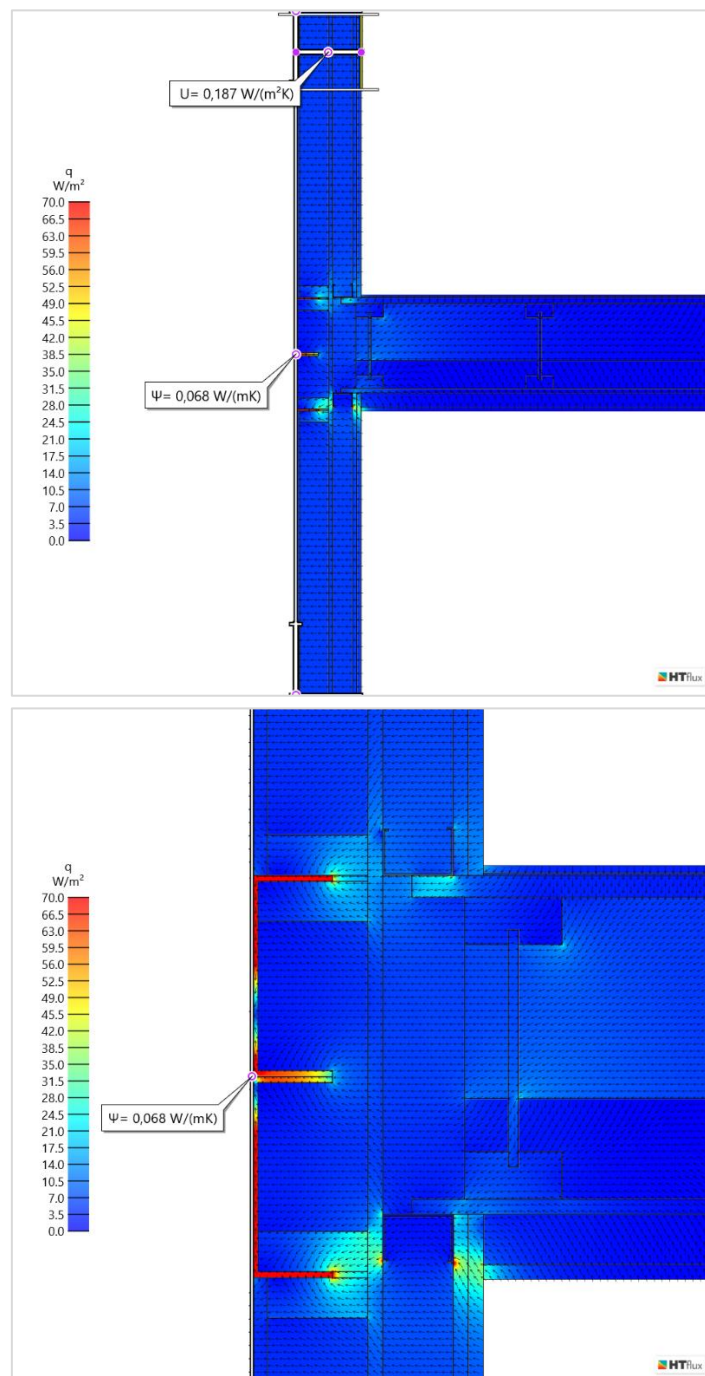


Figura 69. Transmitancias térmicas U y Ψ del encuentro EW1_EW1_CE1. Fuente: HTflux.

- **Criterios de humedad.** Se simula el detalle a partir del mes con condiciones exteriores más desfavorable (enero) y por todo un año. Se detecta producción de condensación en cinco de los doce meses del año. No se observa evaporación de la condensación en meses estivales.

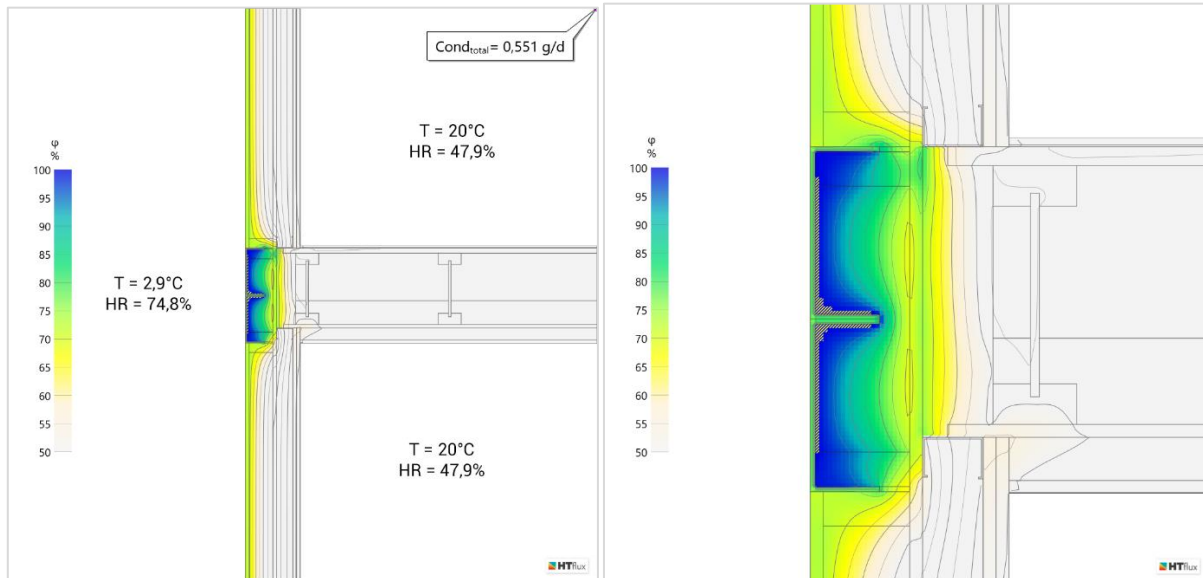


Figura 71. Humedad relativa en mes más desfavorable (enero) del encuentro EW1_EW1_CE1. Fuente: HTflux.

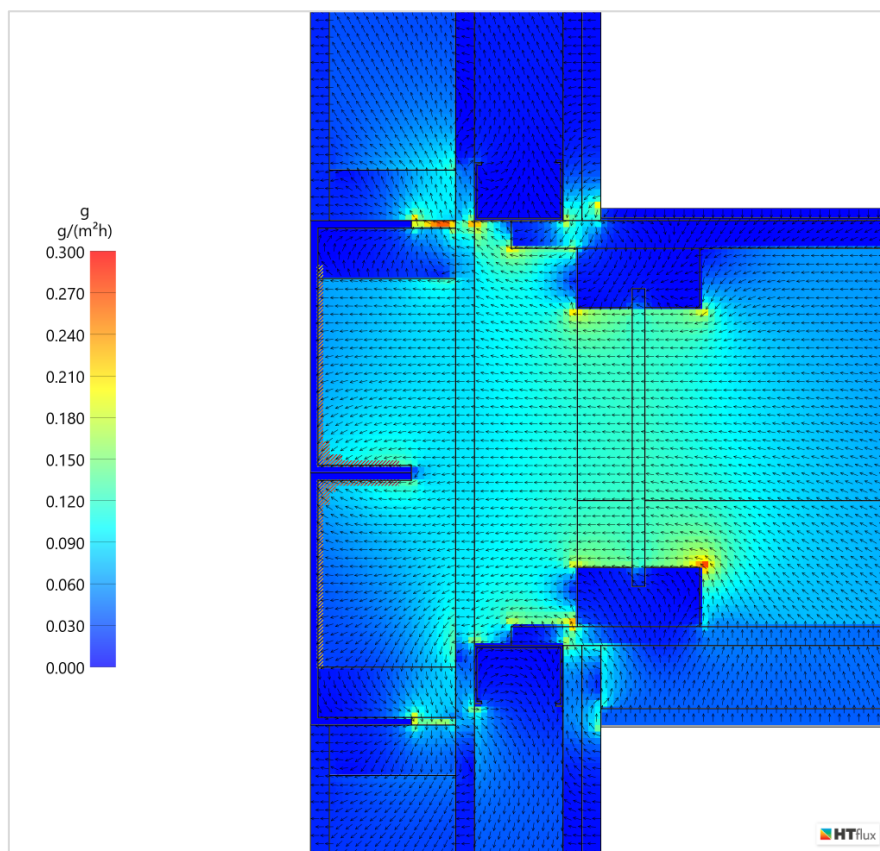


Figura 72. Flujo de vapor en mes más desfavorable (enero) del encuentro EW1_EW1_CE1. Fuente: HTflux.

EW2_EW2_CE1

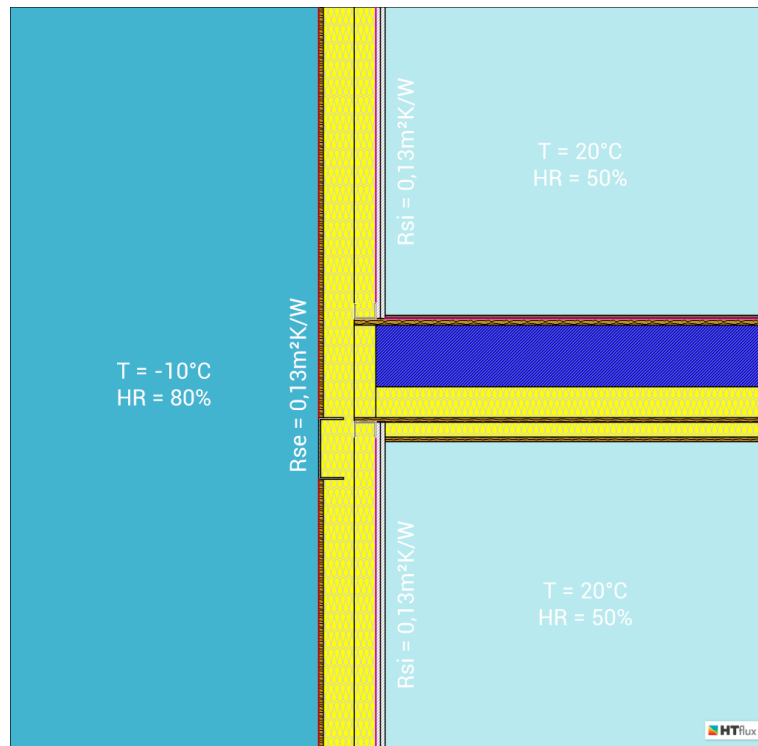


Figura 73. Condiciones de simulación del encuentro EW2_EW2_CE1. Fuente: HTflux.

- **Criterio de higiene.** El punto más frío de este encuentro posee una temperatura de 16,4°C. A partir de este dato, se obtiene el factor de temperatura $f_{R_{si}=0,25m^2K/W}$:

$$f_{R_{si}=0,25m^2K/W} = \frac{T_{si} - T_e}{T_i - T_e} \quad f_{R_{si}=0,25m^2K/W} = \frac{16,4^{\circ}C - (-10^{\circ}C)}{20^{\circ}C - (-10^{\circ}C)} \quad f_{R_{si}=0,25m^2K/W} = 0,88$$

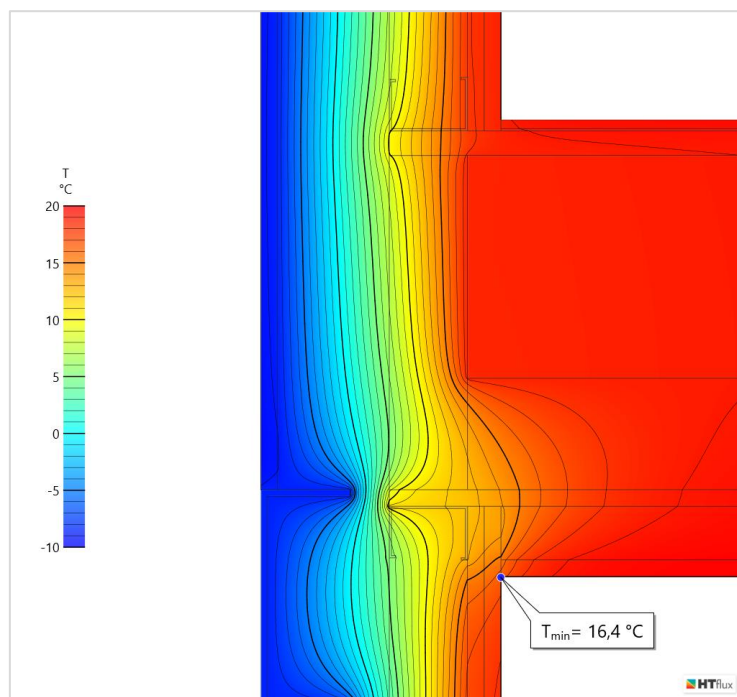


Figura 74. Temperatura superficial interior del encuentro EW2_EW2_CE1. Fuente: HTflux.

- **Criterio de confort.** Dado que es un detalle estrictamente opaco, no existe carpintería en la que verificar el valor de la transmitancia térmica U de la ventana instalada.
- **Criterios de eficiencia.** Se obtiene un valor de transmitancia térmica U del muro portante igual a $0,186 \text{ W/m}^2\text{K}$. En tanto el valor de la transmitancia térmica lineal es igual a $0,026 \text{ W/mK}$. Al tratarse de un encuentro estrictamente opaco, se determina el valor del factor de temperatura, igual al calculado en el criterio de higiene, esto es, un factor de temperatura f_{Rsi} de $0,88$.

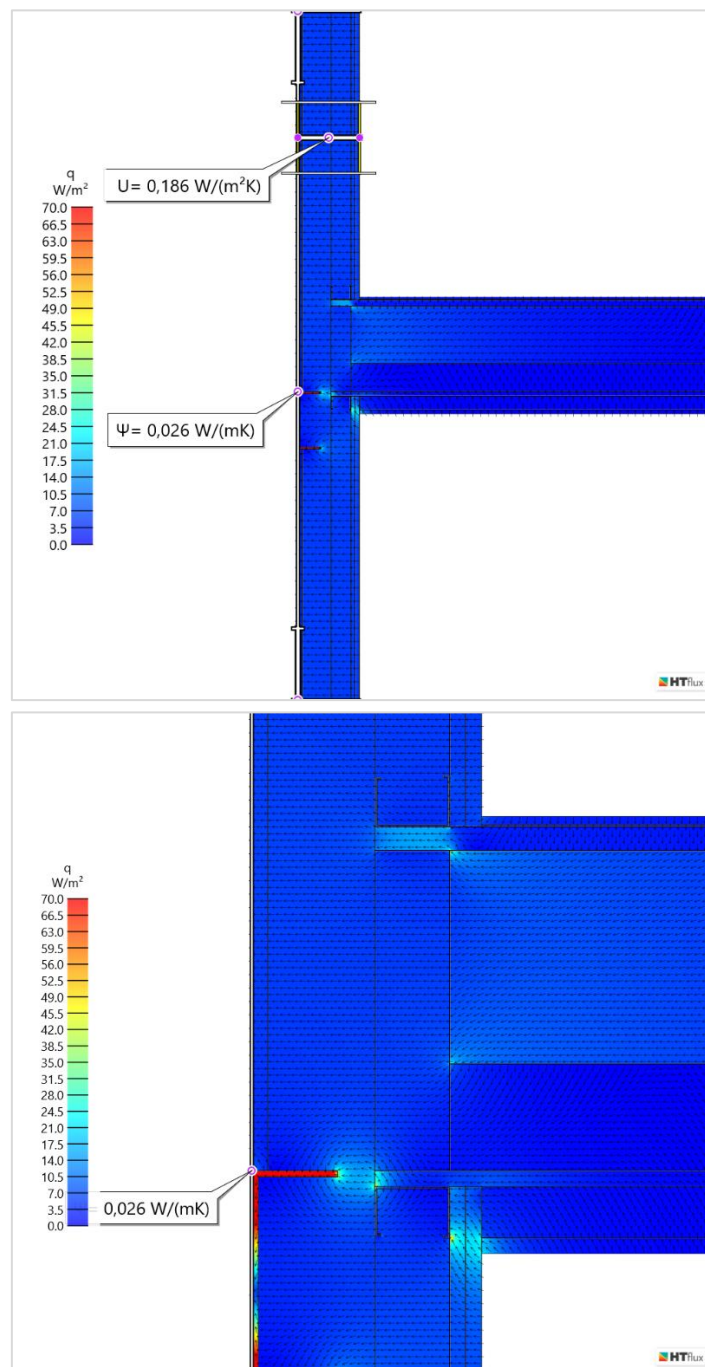


Figura 74. Transmitancias térmicas U y Ψ del encuentro EW2_EW2_CE1. Fuente: HTflux.

- **Criterios de humedad.** Se simula el detalle a partir del mes con las condiciones exteriores más desfavorable (enero) y por todo un año. No se detecta producción de condensación intersticial en ningún mes del año.

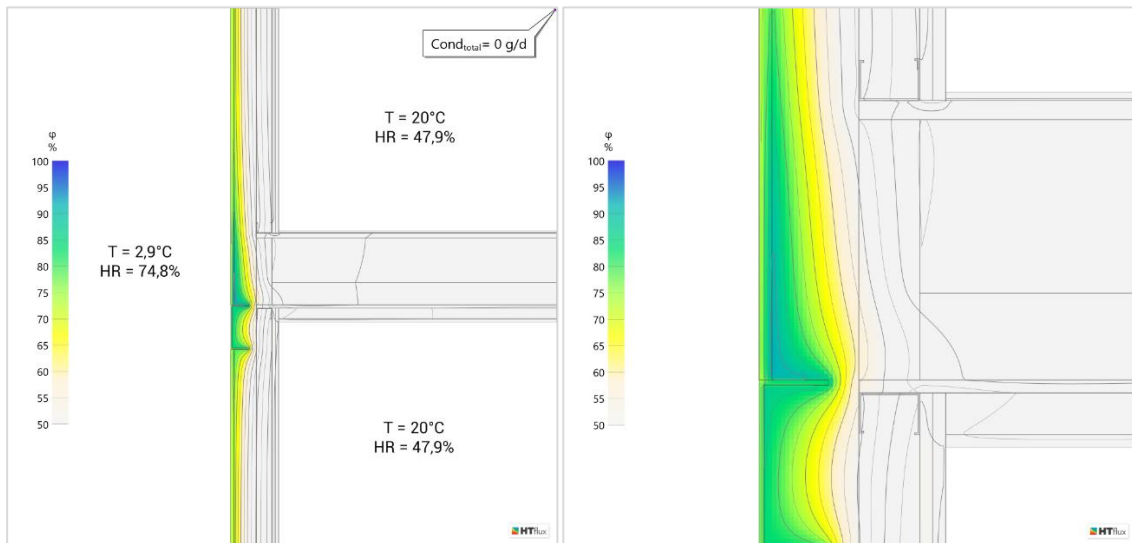


Figura 75. Humedad relativa en mes más desfavorable (enero) del encuentro EW2_EW2_CE1. Fuente: HTflux.

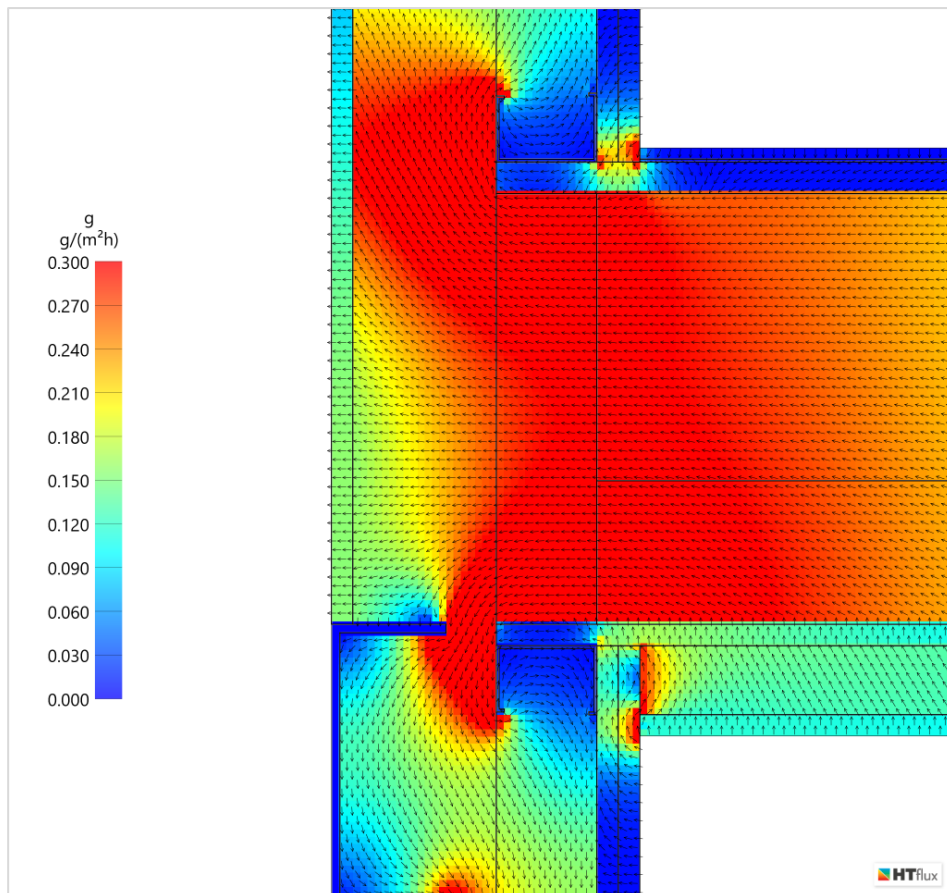


Figura 76. Flujo de vapor en mes más desfavorable (enero) del encuentro EW2_EW2_CE1. Fuente: HTflux.

10.4. Encuentros con carpintería

EW1_OB1

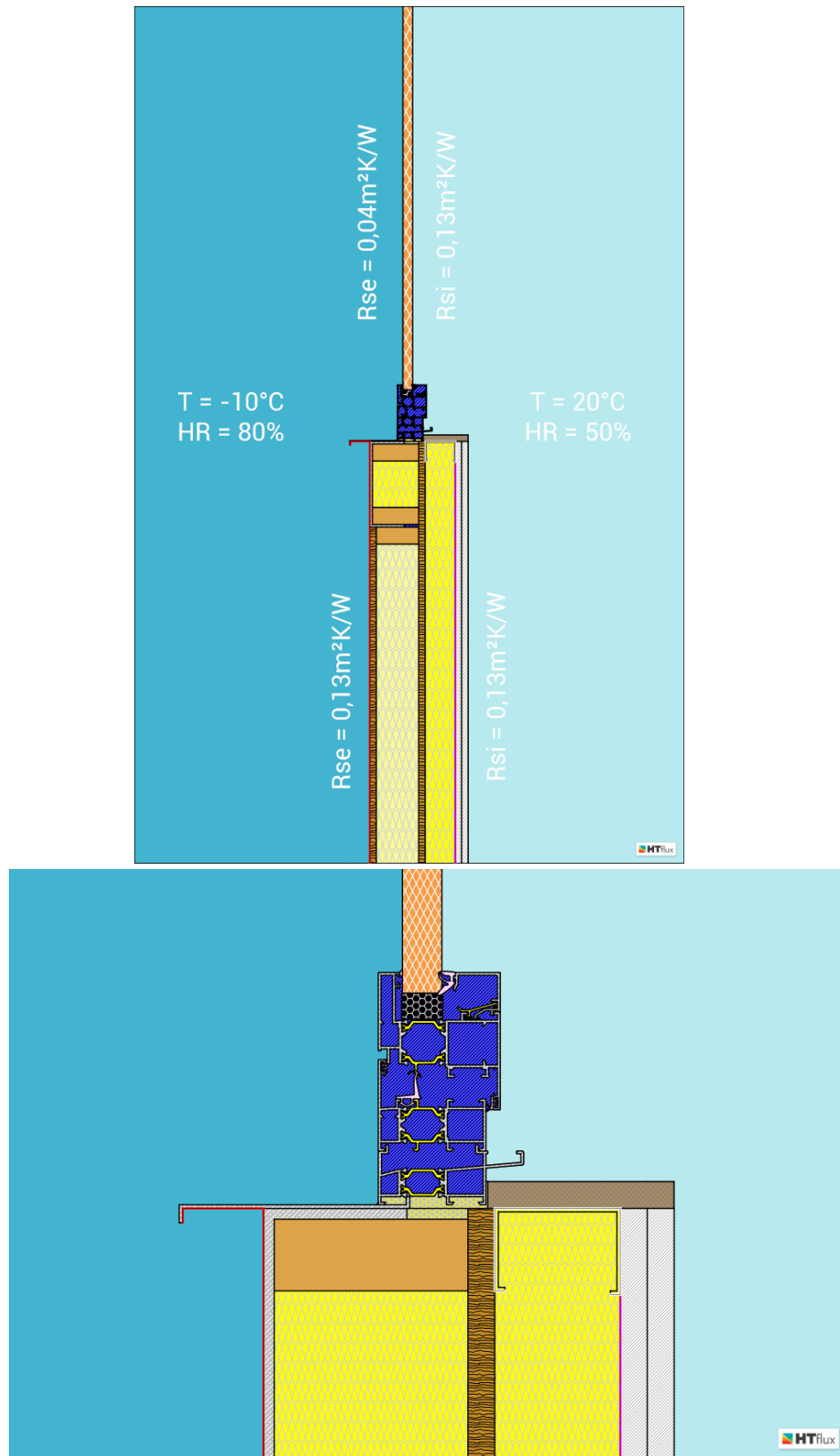


Figura 77. Condiciones de simulación del encuentro EW1_OB1. Fuente: HTflux.

- **Criterio de higiene.** El punto más frío de este encuentro posee una temperatura de 7,7°C. A partir de este dato, se obtiene el factor de temperatura $f_{R_{si}=0,25m^2K/W}$:

$$f_{R_{si}=0,25m^2K/W} = \frac{T_{si} - T_e}{T_i - T_e} \quad f_{R_{si}=0,25m^2K/W} = \frac{7,7^{\circ}C - (-10^{\circ}C)}{20^{\circ}C - (-10^{\circ}C)} \quad f_{R_{si}=0,25m^2K/W} = 0,59$$

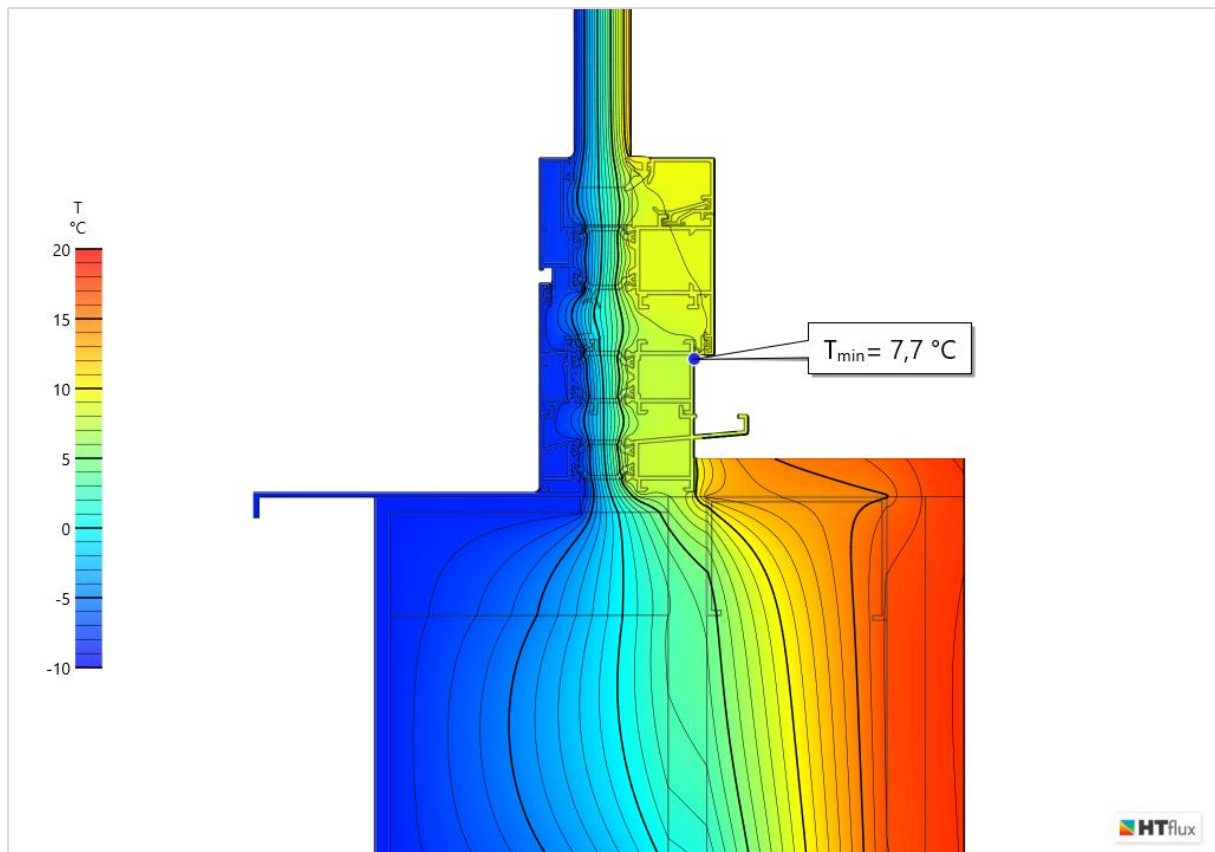


Figura 78. Temperatura superficial interior del encuentro EW1_OB1. Fuente: HTflux.

- **Criterio de confort.** Con la adopción de la ventana Extrugasa de la serie XP 60 TH, los valores de transmitancia térmica de ventana y vidrio son superiores a los límites establecidos por el estándar. Por lo tanto, no es necesario calcular U_w .
- **Criterios de eficiencia.** Se obtiene un valor de transmitancia térmica U de la fachada hastial igual a 0,188W/m²K. El valor de la transmitancia térmica lineal es igual a 0,352W/mK.

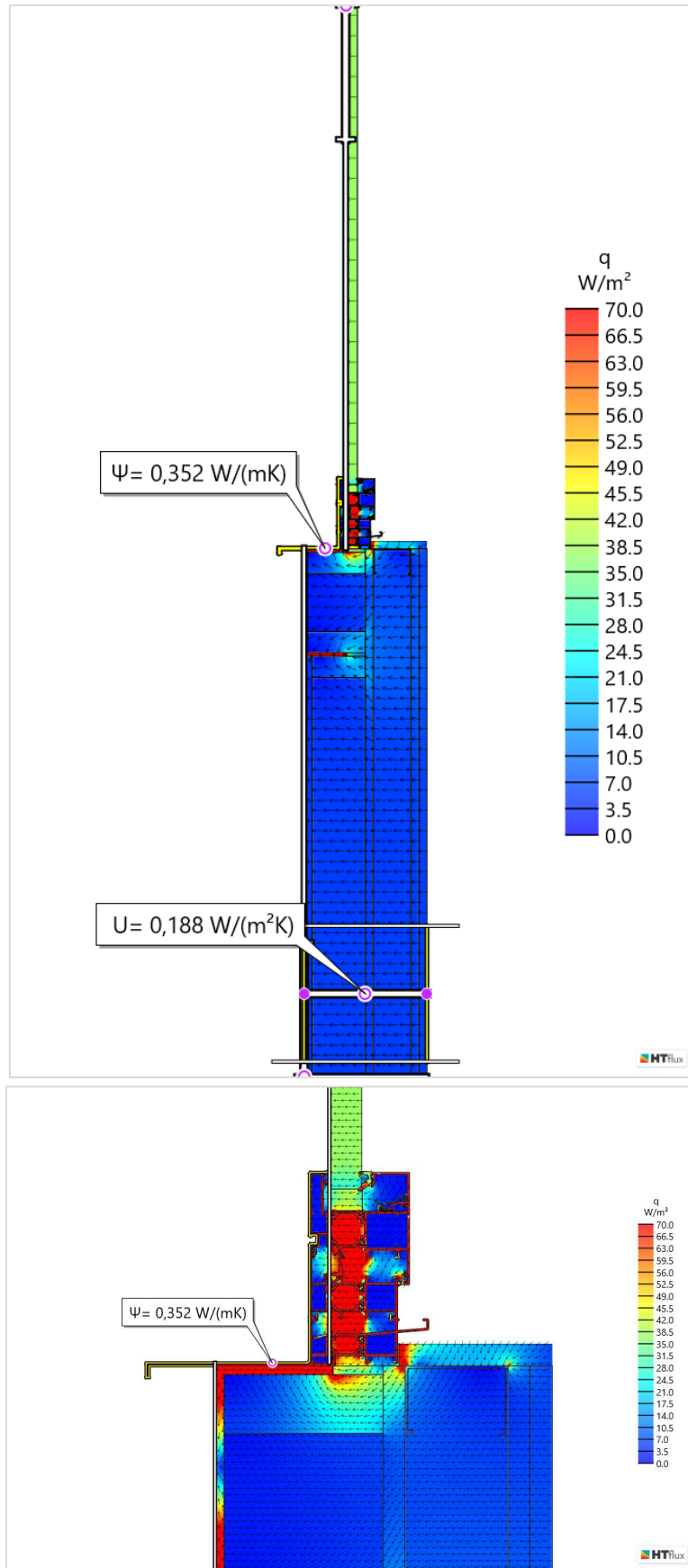


Figura 77. Transmitancias térmicas U y Ψ del encuentro EW1_OB1. Fuente: HTflux.

- **Criterios de humedad.** Se simula el detalle a partir del mes con las condiciones exteriores más desfavorable (enero) y por todo un año. No se detecta producción de condensación intersticial en ningún mes del año.

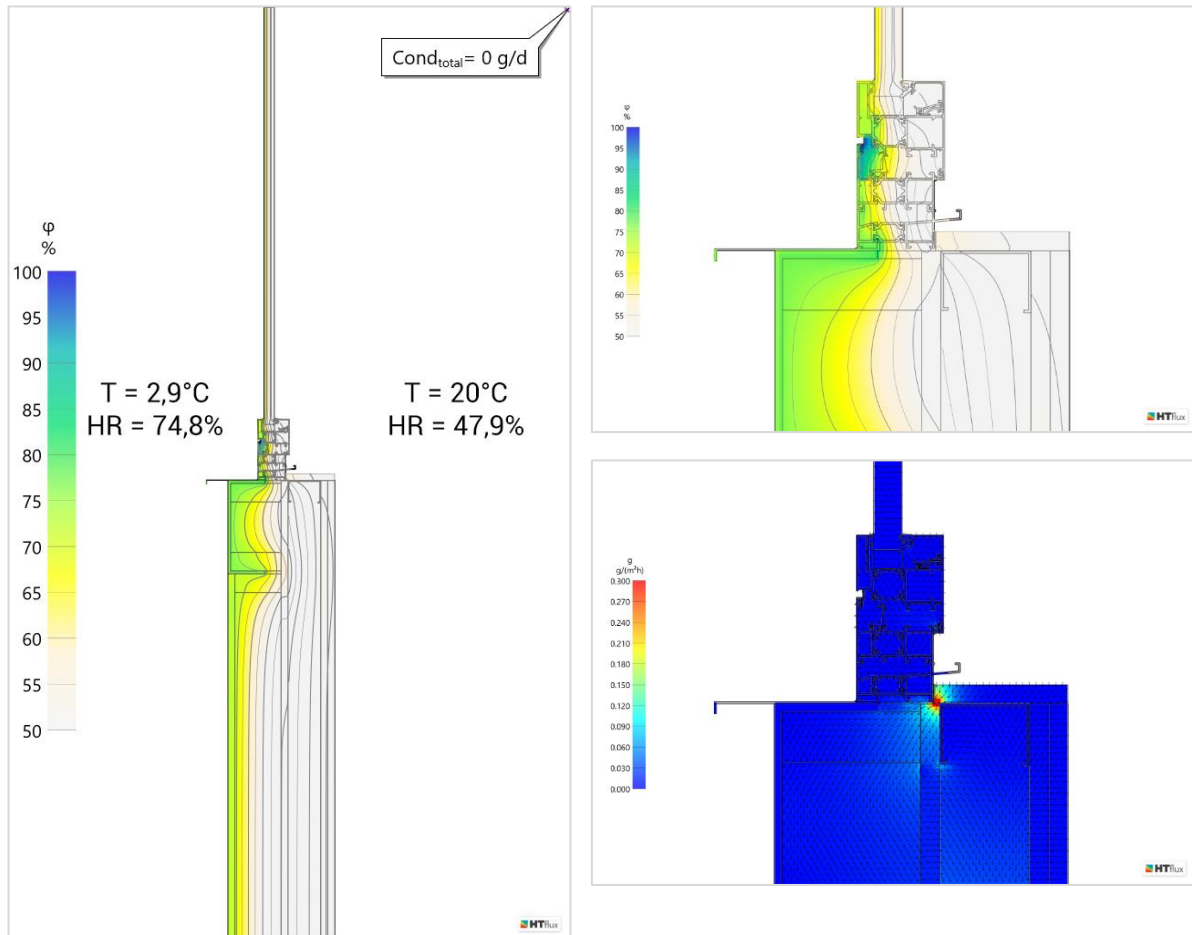


Figura 78. Humedad relativa y flujo de vapor en mes más desfavorable (enero) del encuentro EW1_OB1.
Fuente: HTflux.

EW1_OH1

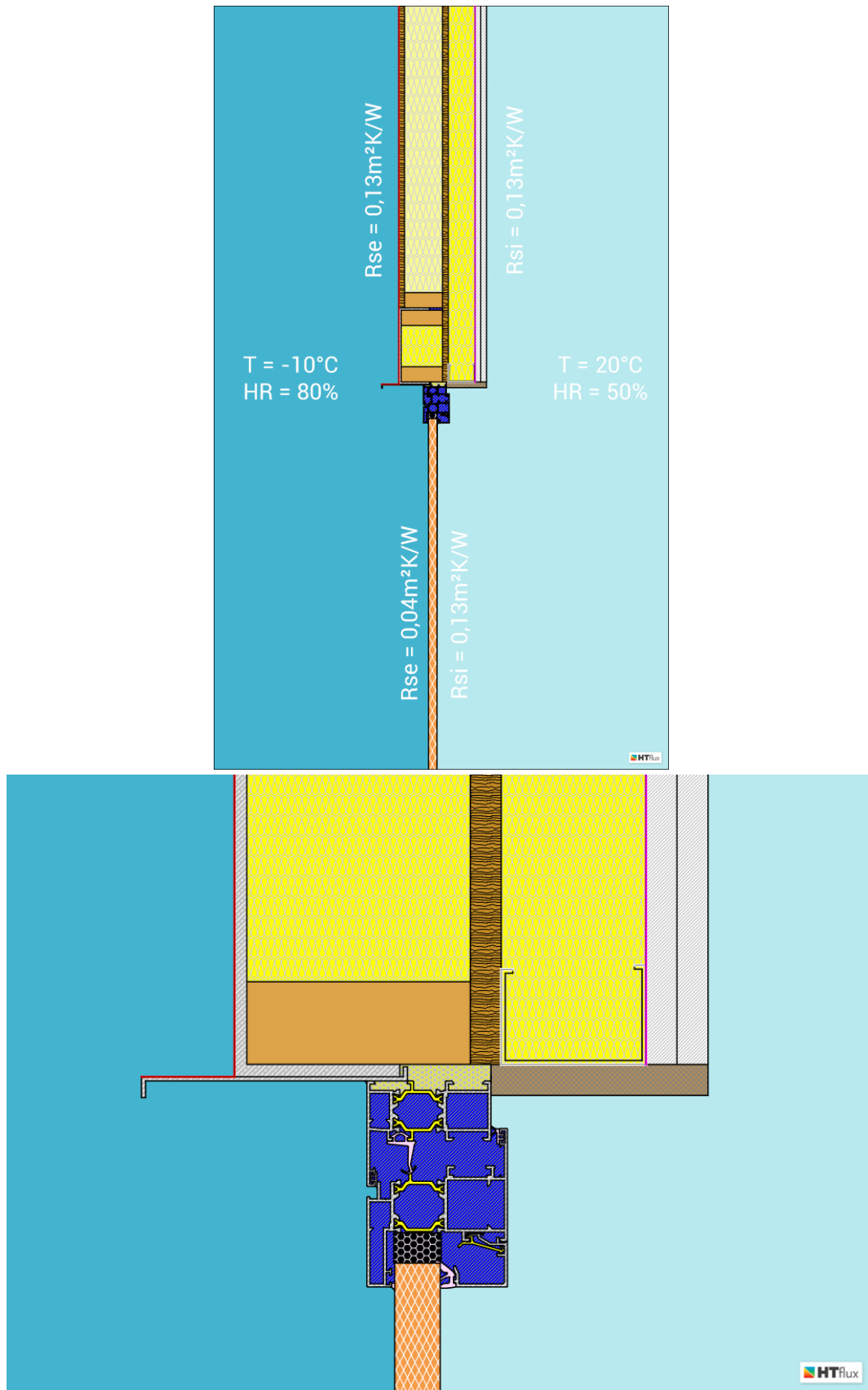


Figura 79. Condiciones de simulación del encuentro EW1_OH1. Fuente: HTflux.

- **Criterio de higiene.** El punto más frío de este encuentro posee una temperatura de 6,8°C. A partir de este dato, se obtiene el factor de temperatura $f_{R_{si}=0,25m^2K/W}$:

$$f_{R_{si}=0,25m^2K/W} = \frac{T_{si} - T_e}{T_i - T_e} \quad f_{R_{si}=0,25m^2K/W} = \frac{6,8^{\circ}C - (-10^{\circ}C)}{20^{\circ}C - (-10^{\circ}C)} \quad f_{R_{si}=0,25m^2K/W} = 0,56$$

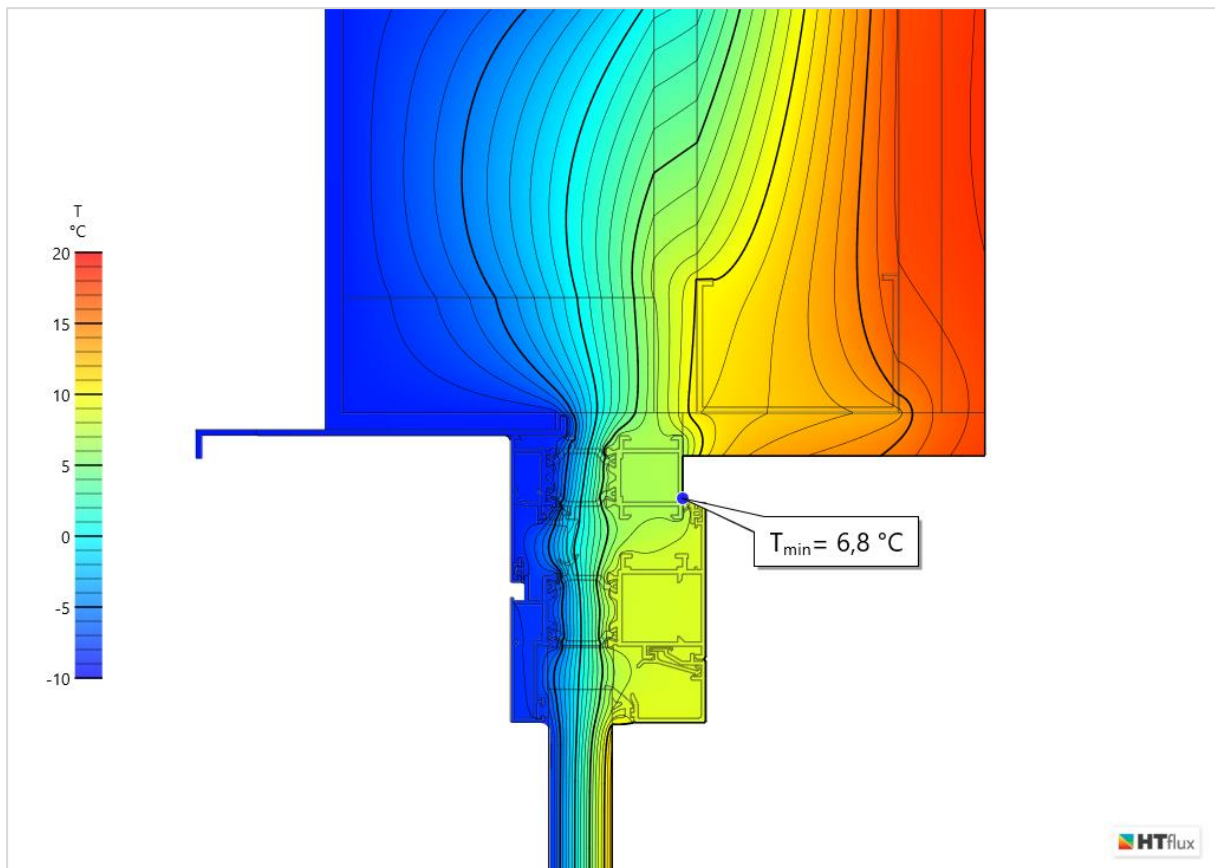


Figura 80. Temperatura superficial interior del encuentro EW1_OH1. Fuente: HTflux.

- **Criterio de confort.** Con la adopción de la ventana Extrugasa de la serie XP 60 TH, los valores de transmitancia térmica de ventana y vidrio son superiores a los límites establecidos por el estándar. Por lo tanto, no es necesario calcular U_w .
- **Criterios de eficiencia.** Se obtiene un valor de transmitancia térmica U de la fachada hastial igual a 0,188W/m²K. El valor de la transmitancia térmica lineal es igual a 0,254W/mK.

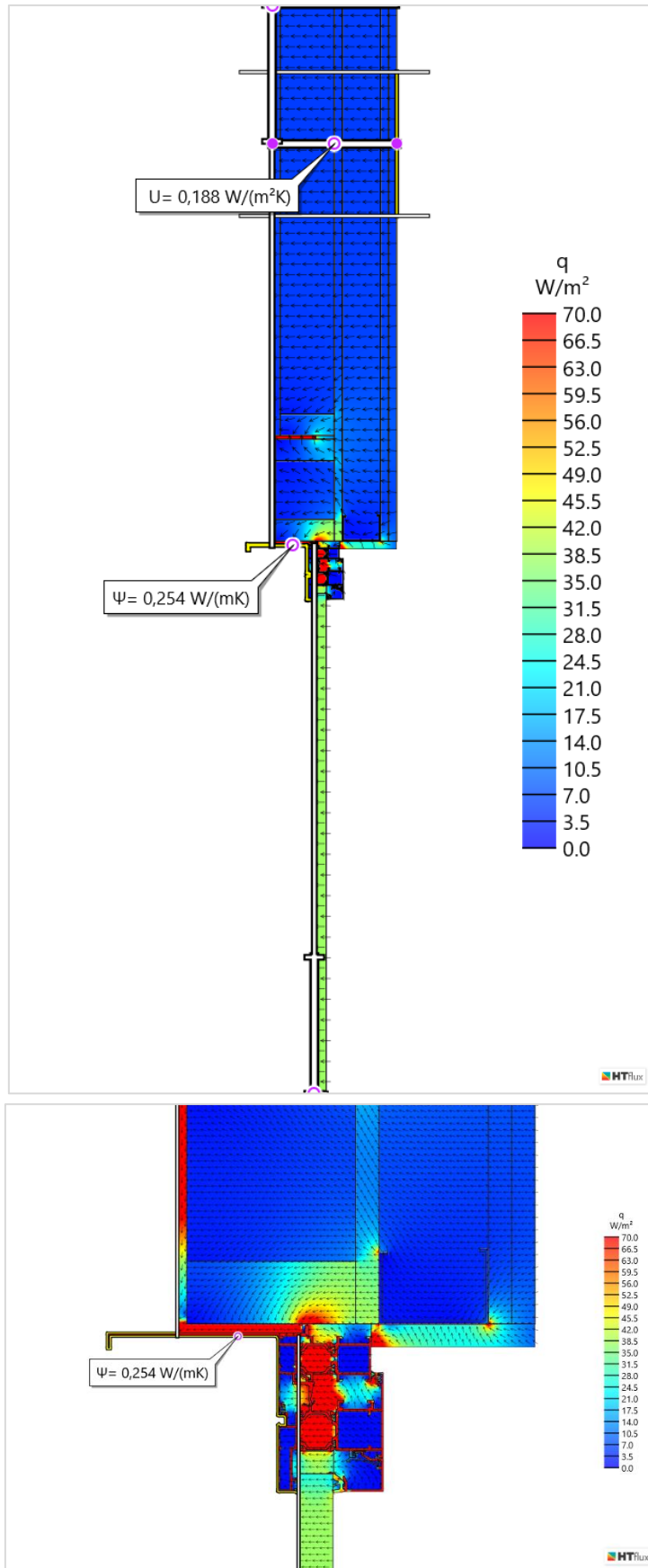


Figura 81. Transmitancias térmicas U y Ψ del encuentro EW1_OH1. Fuente: HTflux.

- **Criterios de humedad.** Se simula el detalle a partir del mes con las condiciones exteriores más desfavorable (enero) y por todo un año. No se detecta producción de condensación intersticial en ningún mes del año.

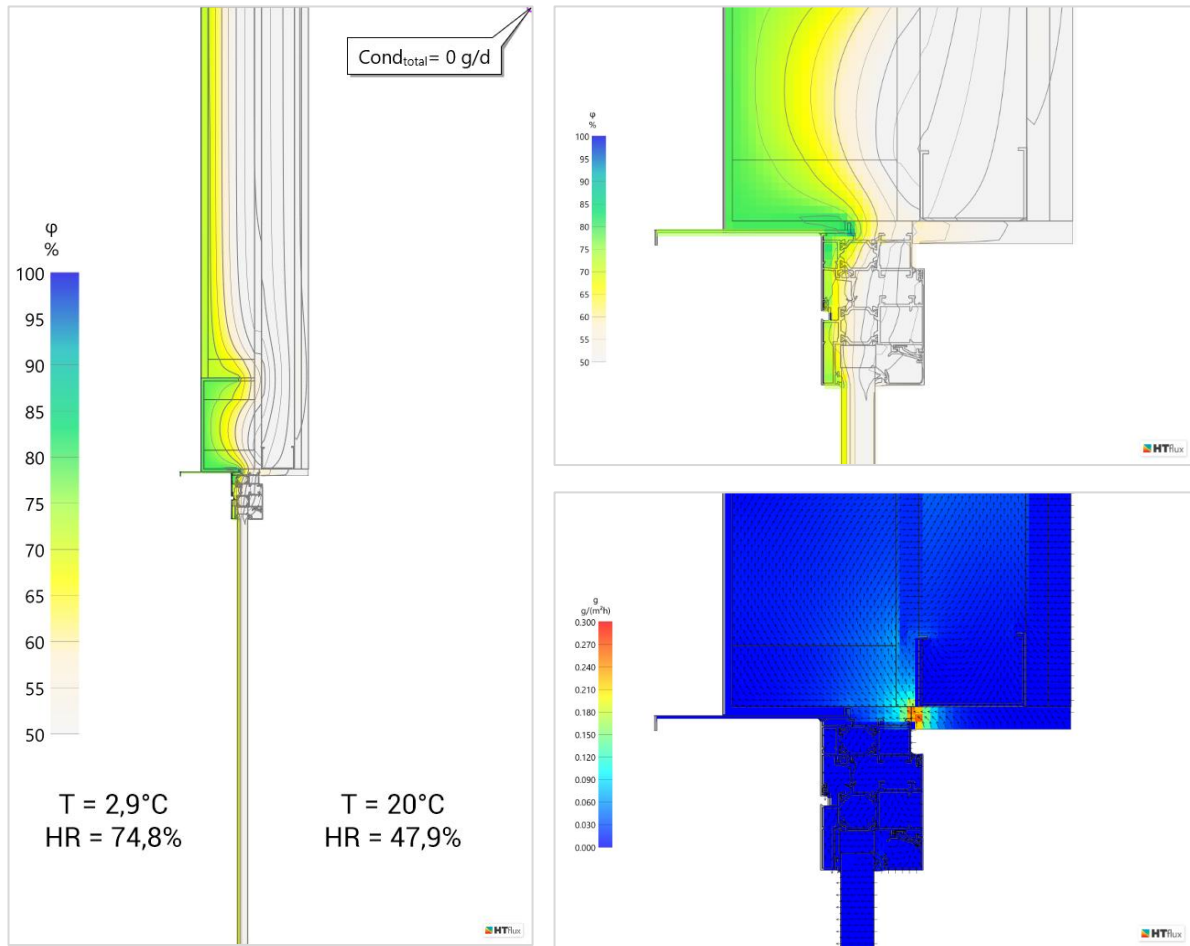


Figura 82. Humedad relativa y flujo de vapor en mes más desfavorable (enero) del encuentro EW1_OH1.
Fuente: HTflux.

EW1_OJ1

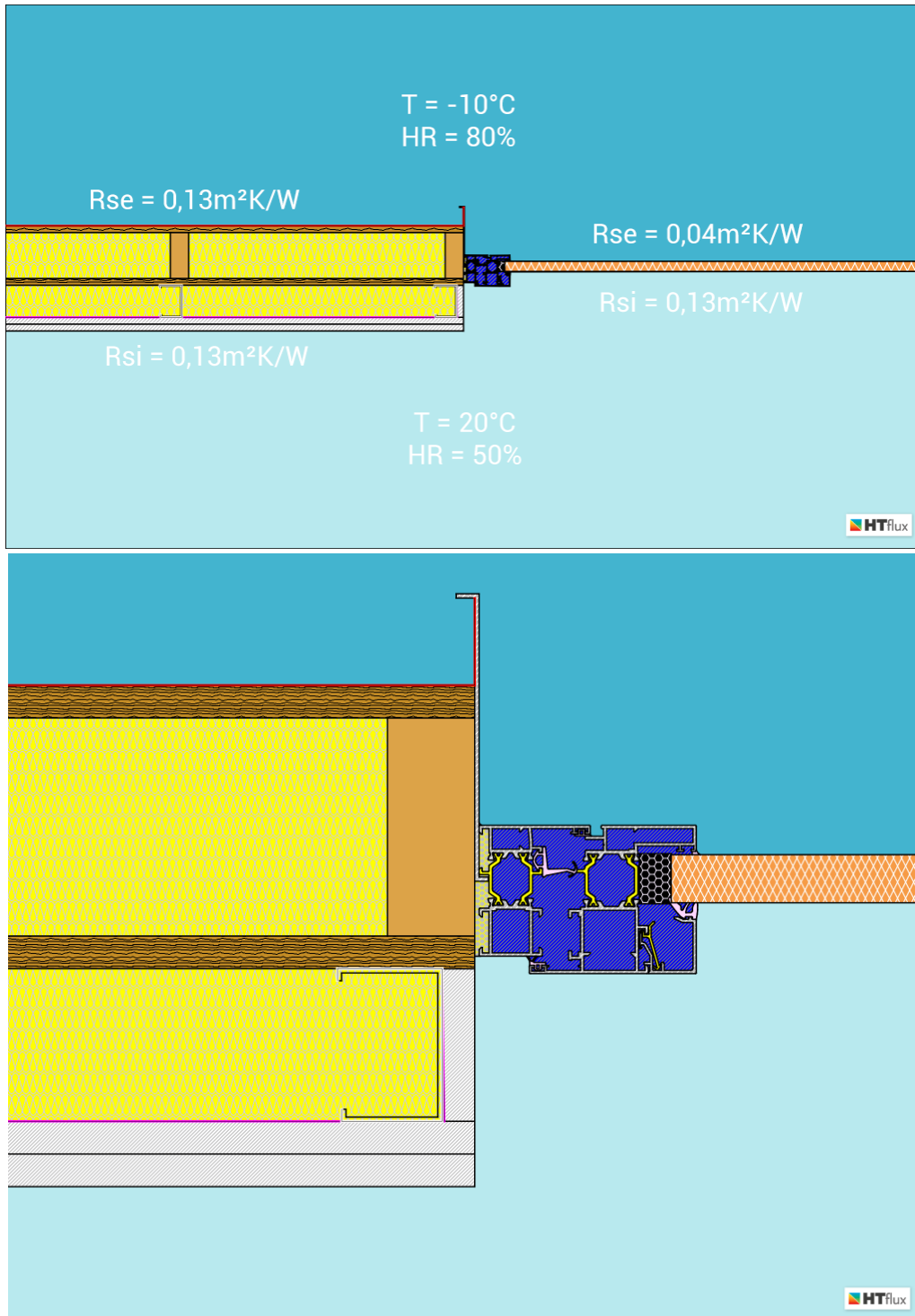


Figura 83. Condiciones de simulación del encuentro EW1_OJ1. Fuente: HTflux.

- **Criterio de higiene.** El punto más frío de este encuentro posee una temperatura de 5,3°C. A partir de este dato, se obtiene el factor de temperatura $f_{R_{si}=0,25m^2K/W}$:

$$f_{R_{si}=0,25m^2K/W} = \frac{T_{si} - T_e}{T_i - T_e} \quad f_{R_{si}=0,25m^2K/W} = \frac{5,3^\circ C - (-10^\circ C)}{20^\circ C - (-10^\circ C)} \quad f_{R_{si}=0,25m^2K/W} = 0,51$$

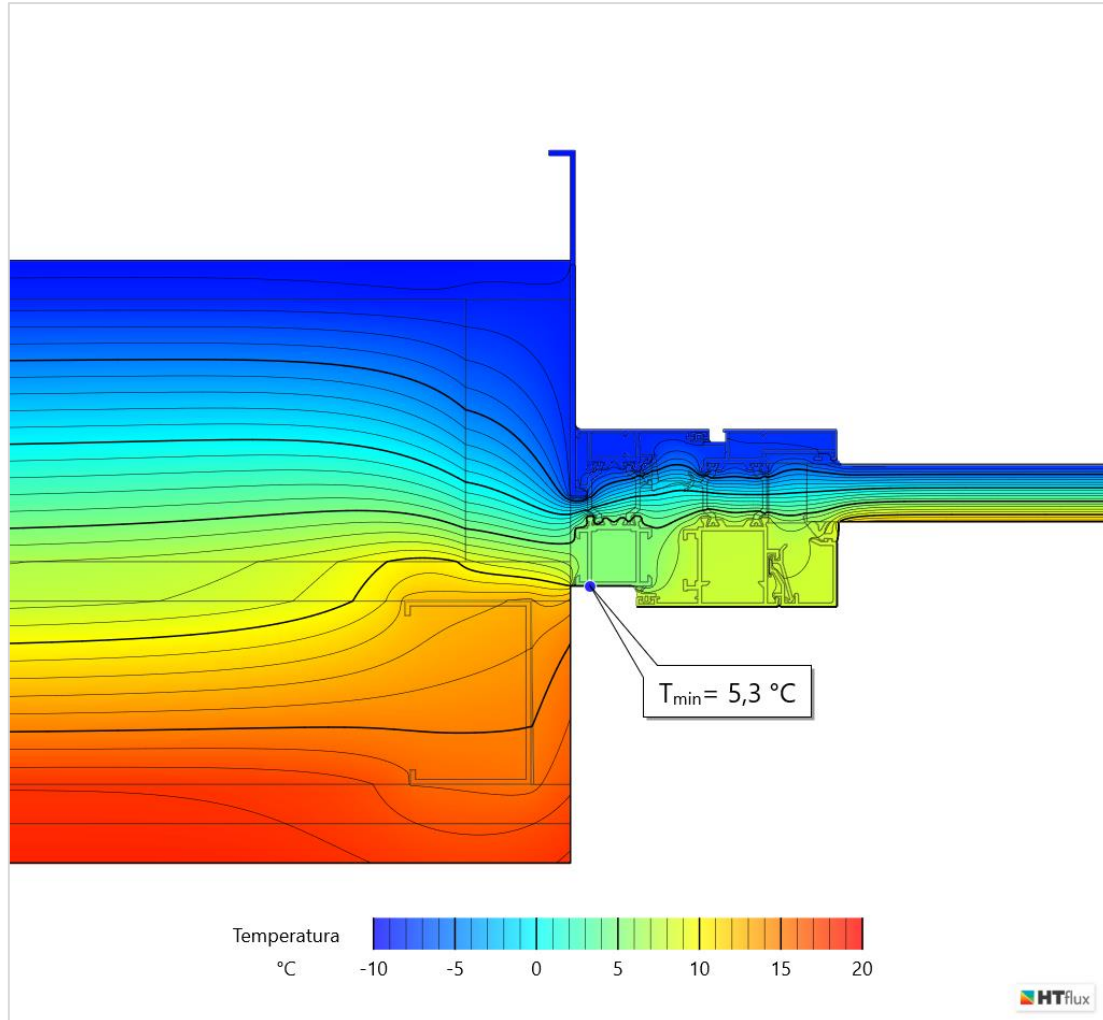


Figura 84. Temperatura superficial interior del encuentro EW1_OJ1. Fuente: HTflux.

- **Criterio de confort.** Con la adopción de la ventana Extrugasa de la serie XP 60 TH, los valores de transmitancia térmica de ventana y vidrio son superiores a los límites establecidos por el estándar. Por lo tanto, no es necesario calcular U_w .
- **Criterios de eficiencia.** Se obtiene un valor de transmitancia térmica U de la fachada hastial igual a 0,185W/m²K en el área homogénea. El valor de la transmitancia térmica lineal es igual a 0,273W/mK.

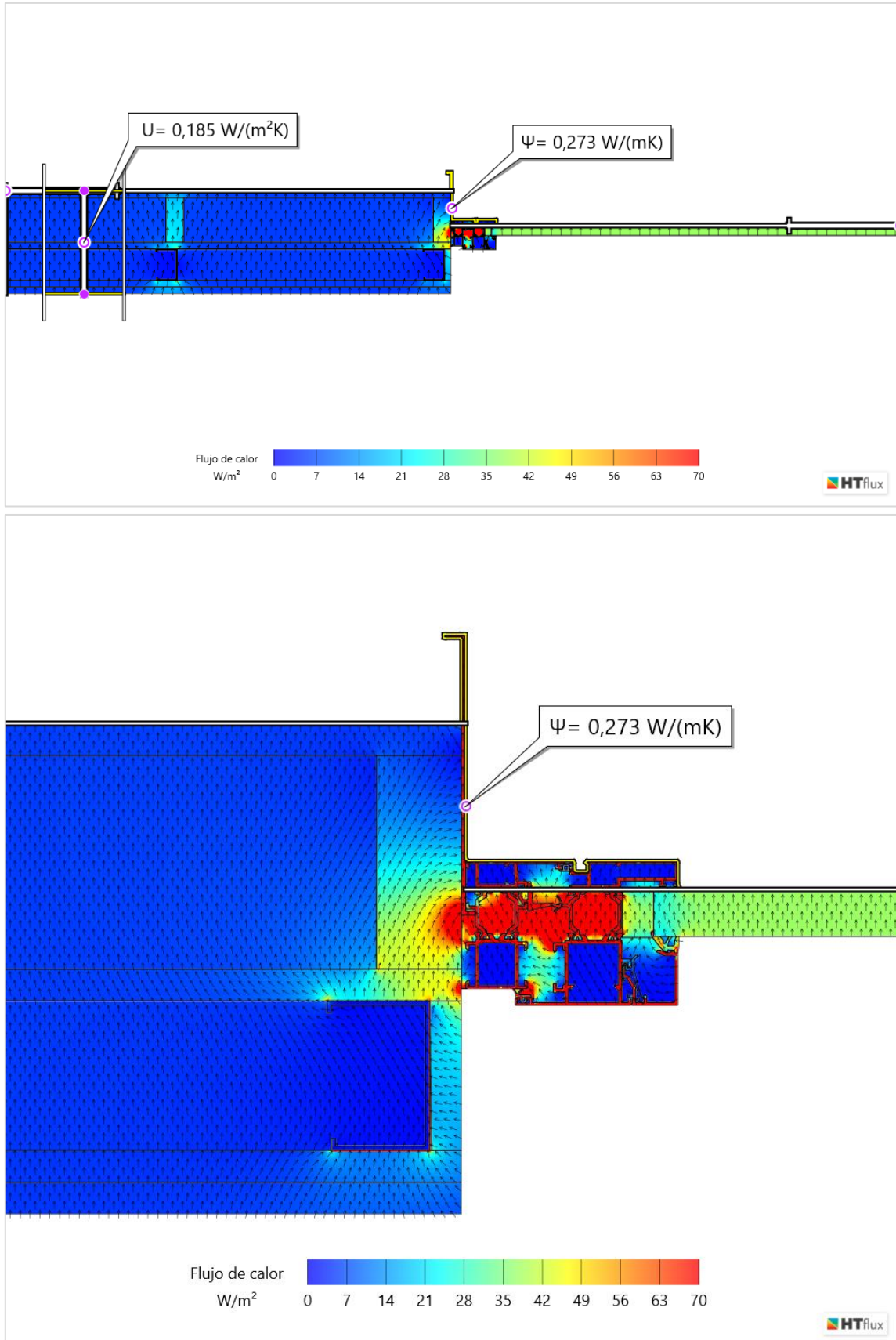


Figura 85. Transmitancias térmicas U y Ψ del encuentro EW1_OJ1. Fuente: HTflux.

- **Criterios de humedad.** Se simula el detalle a partir del mes con las condiciones exteriores más desfavorable (enero) y por todo un año. No se detecta producción de condensación intersticial en ningún mes del año.

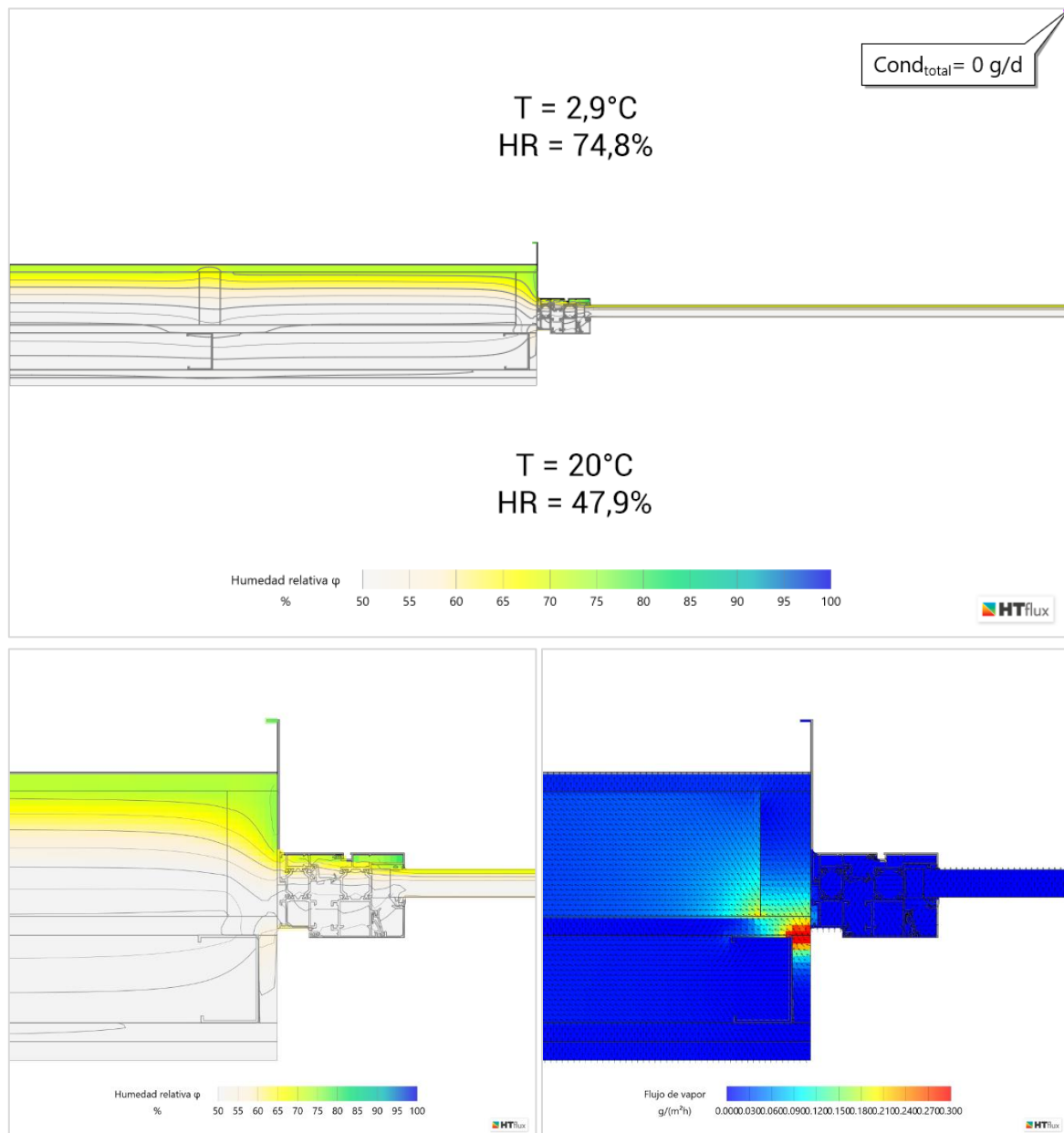


Figura 86. Humedad relativa y flujo de vapor en mes más desfavorable (enero) del encuentro EW1_OJ1.
Fuente: HTflux.

EW2_OB1

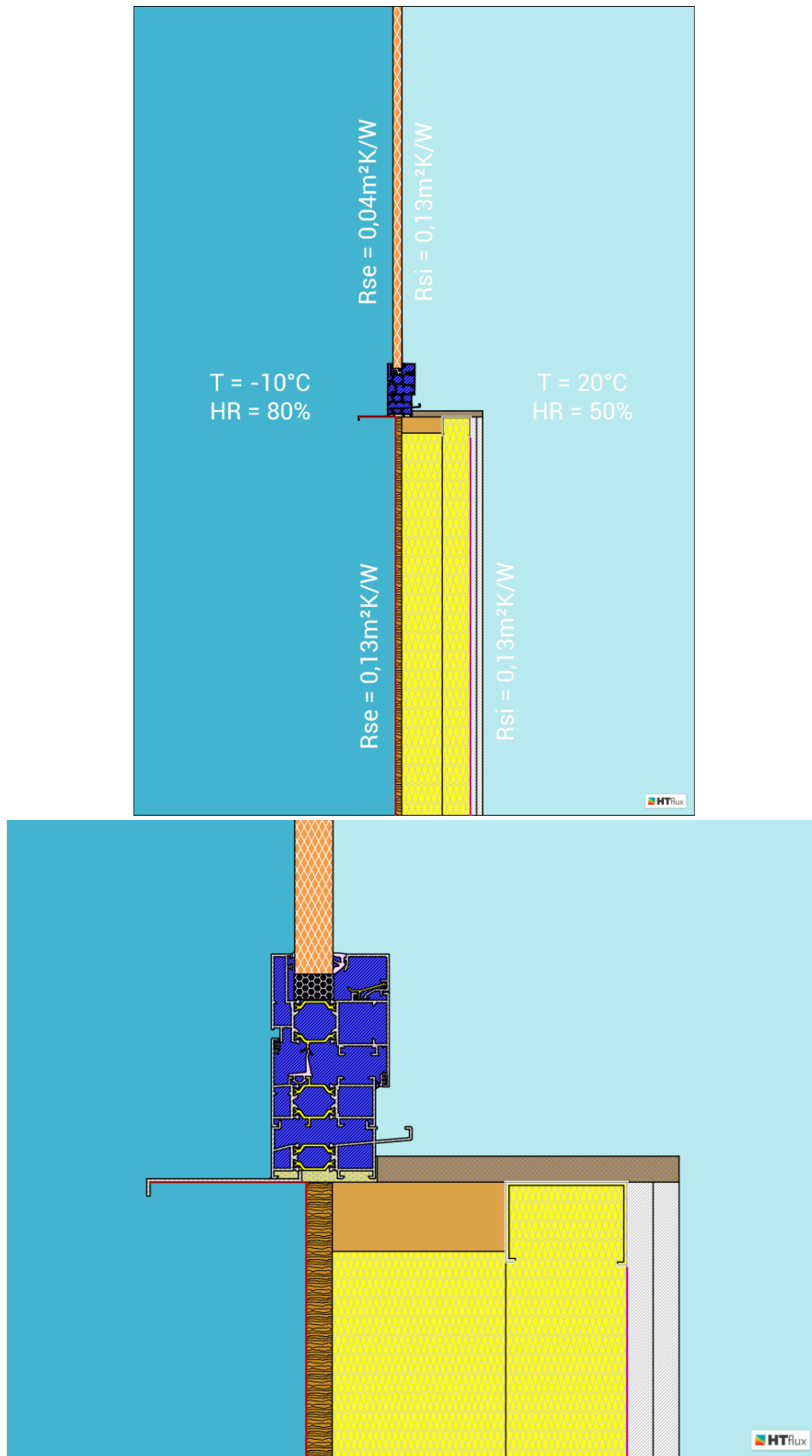


Figura 87. Condiciones de simulación del encuentro EW2_OB1. Fuente: HTflux.

- **Criterio de higiene.** El punto más frío de este encuentro posee una temperatura de 7,0°C. A partir de este dato, se obtiene el factor de temperatura $f_{R_{si}=0,25m^2K/W}$:

$$f_{R_{si}=0,25m^2K/W} = \frac{T_{si} - T_e}{T_i - T_e} \quad f_{R_{si}=0,25m^2K/W} = \frac{7,0^{\circ}C - (-10^{\circ}C)}{20^{\circ}C - (-10^{\circ}C)} \quad f_{R_{si}=0,25m^2K/W} = 0,56$$

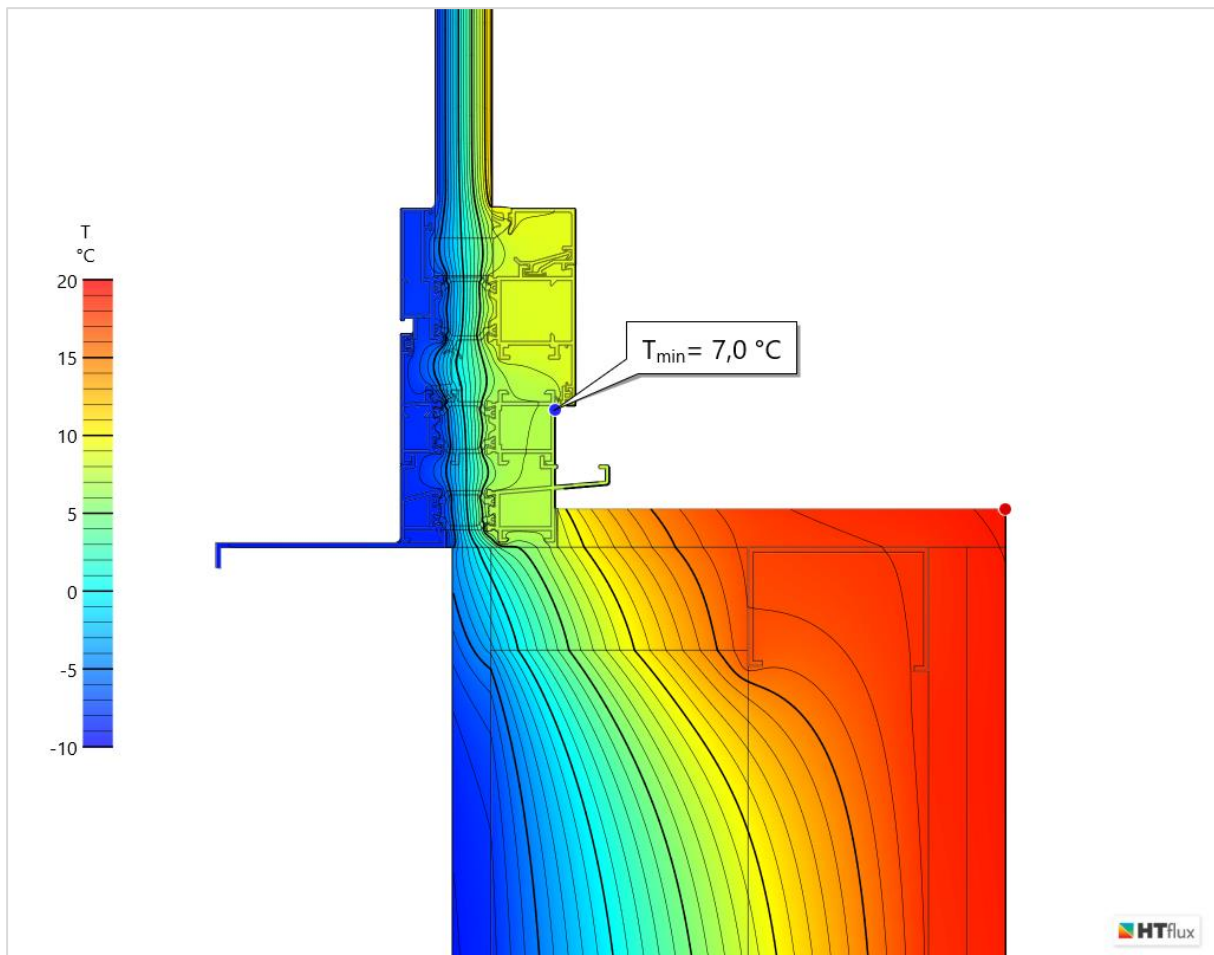


Figura 88. Temperatura superficial interior del encuentro EW2_OB1. Fuente: HTflux.

- **Criterio de confort.** Con la adopción de la ventana Extrugasa de la serie XP 60 TH, los valores de transmitancia térmica de ventana y vidrio son superiores a los límites establecidos por el estándar. Por lo tanto, no es necesario calcular U_w .
- **Criterios de eficiencia.** Se obtiene un valor de transmitancia térmica U de muro portante igual a 0,186W/m²K. El valor de la transmitancia térmica lineal es igual a 0,347W/mK.

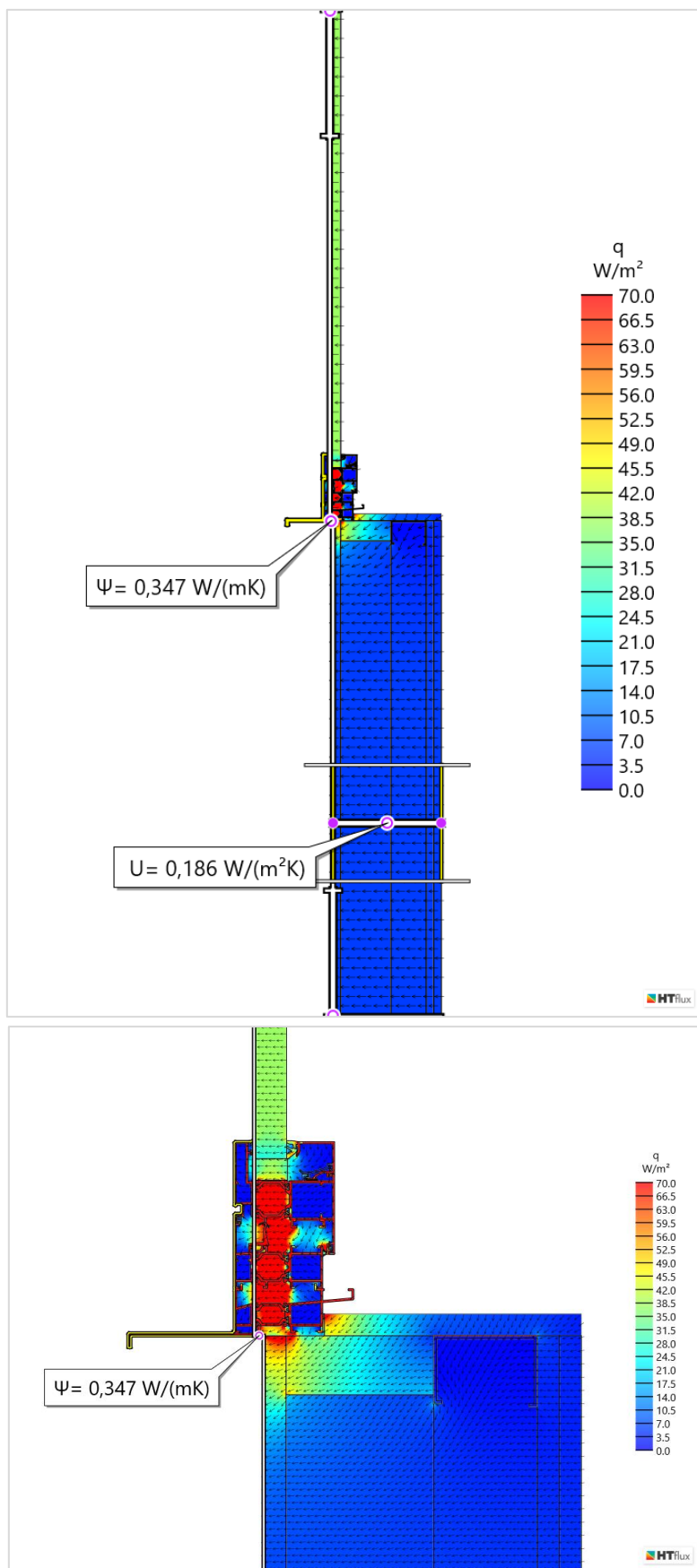


Figura 89. Transmitancias térmicas U y Ψ del encuentro EW2_OB1. Fuente: HTflux.

- **Criterios de humedad.** Se simula el detalle a partir del mes con las condiciones exteriores más desfavorable (enero) y por todo un año. No se detecta producción de condensación intersticial en ningún mes del año.

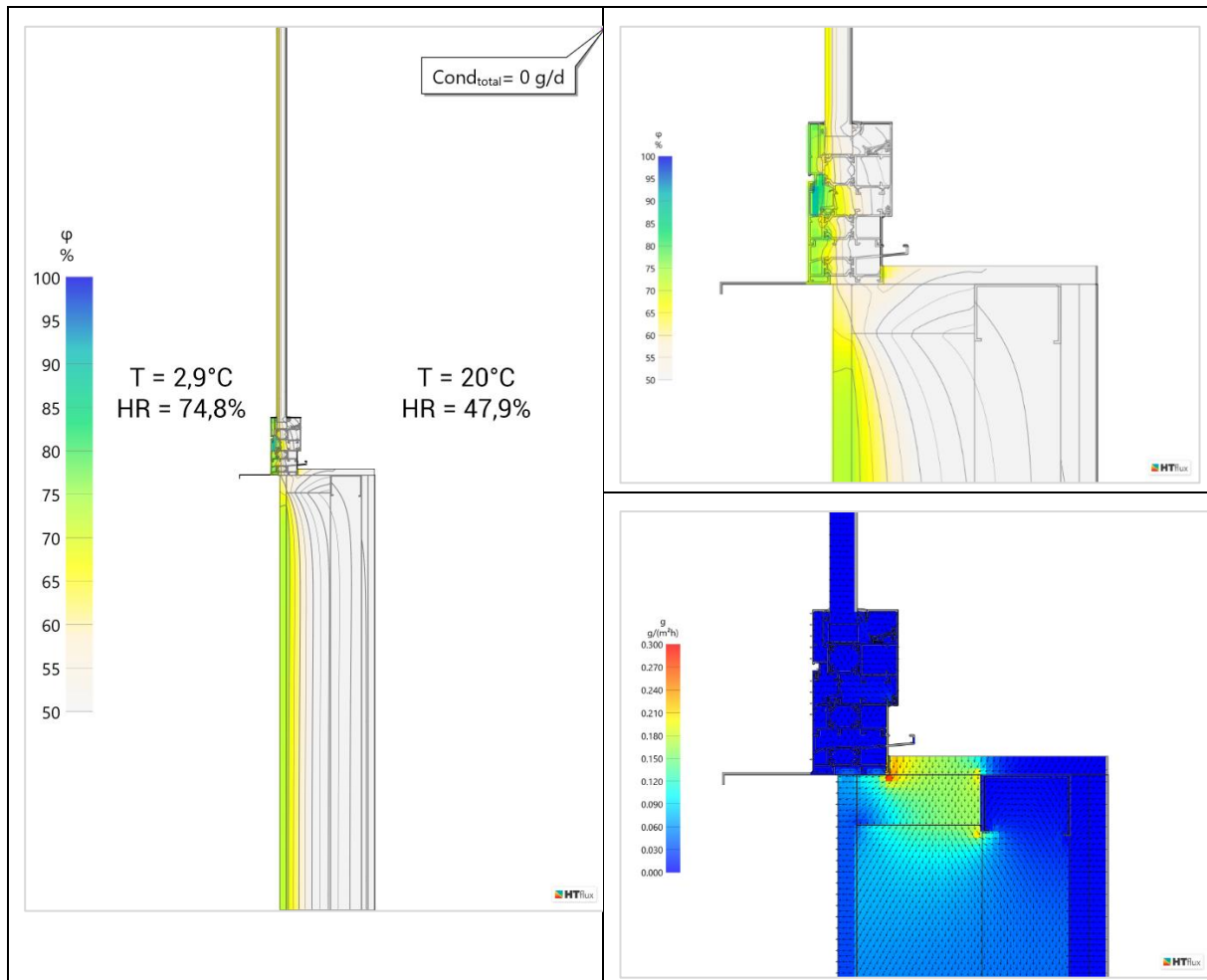


Figura 90. Humedad relativa y flujo de vapor en mes más desfavorable (enero) del encuentro EW2_OB1.
Fuente: HTflux.

EW2_OH1

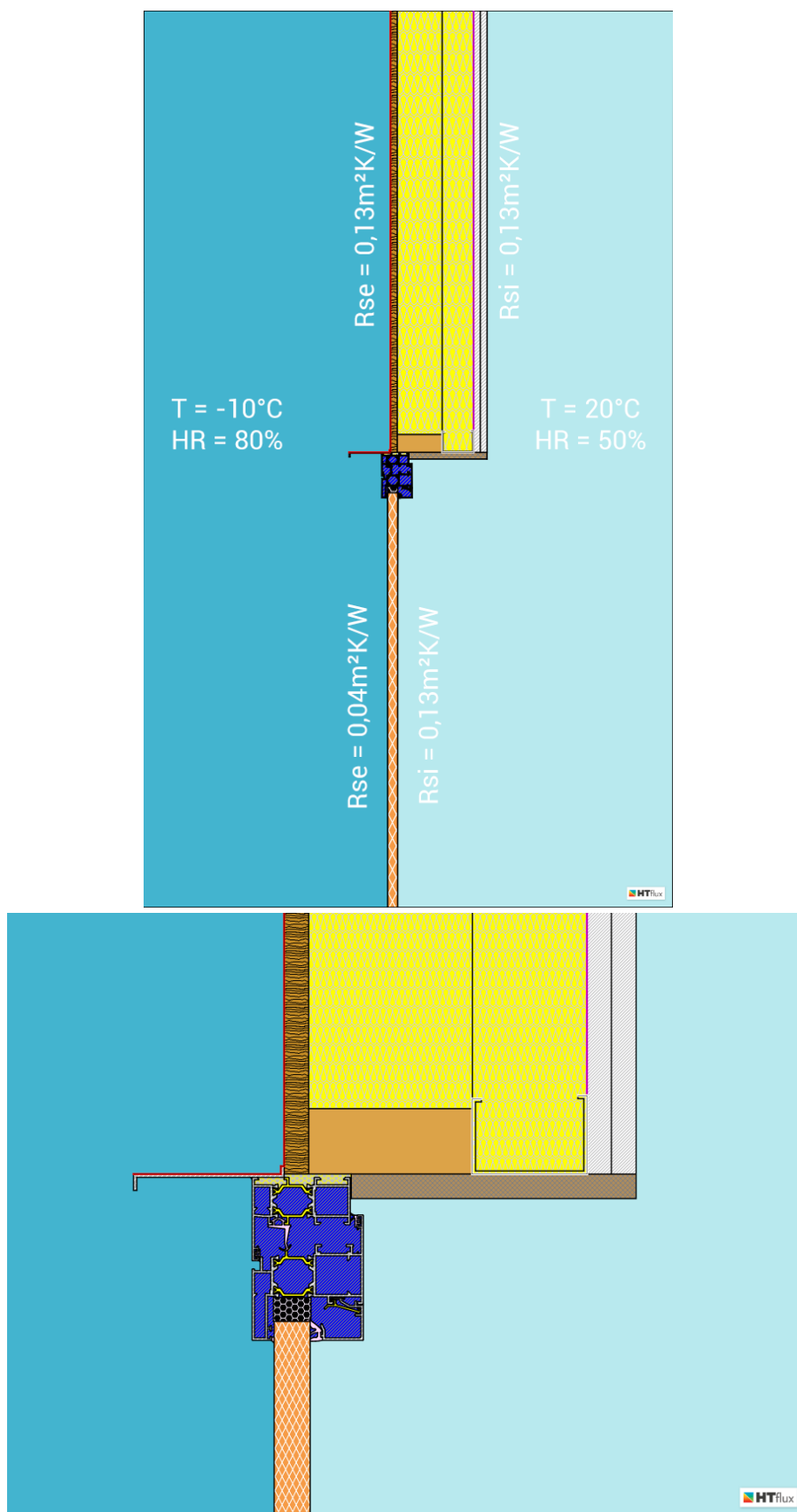


Figura 91. Condiciones de simulación del encuentro EW2_OH1. Fuente: HTflux.

- **Criterio de higiene.** El punto más frío de este encuentro posee una temperatura de 5,1°C. A partir de este dato, se obtiene el factor de temperatura $f_{R_{si}=0,25m^2K/W}$:

$$f_{R_{si}=0,25m^2K/W} = \frac{T_{si} - T_e}{T_i - T_e} \quad f_{R_{si}=0,25m^2K/W} = \frac{5,1^{\circ}C - (-10^{\circ}C)}{20^{\circ}C - (-10^{\circ}C)} \quad f_{R_{si}=0,25m^2K/W} = 0,50$$

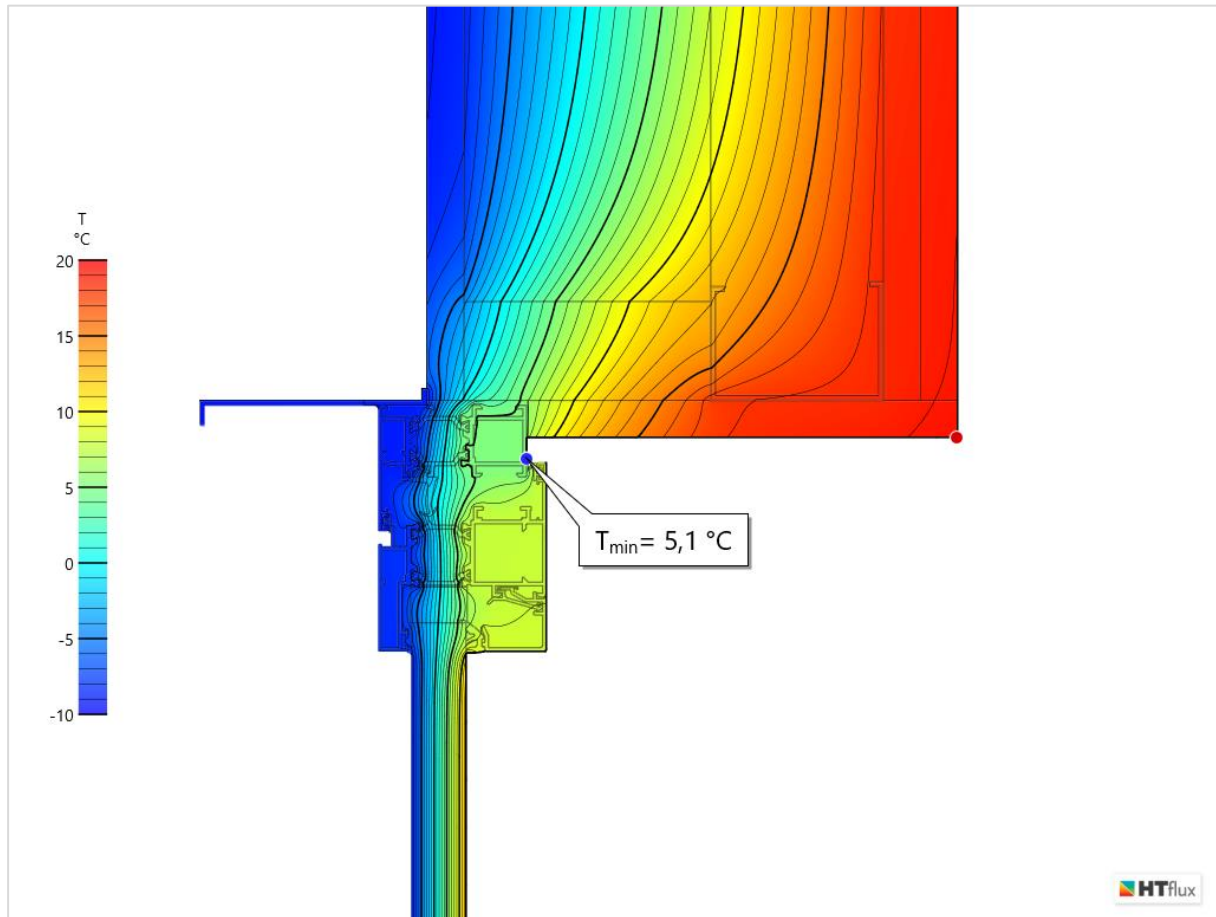


Figura 92. Temperatura superficial interior del encuentro EW2_OH1. Fuente: HTflux.

- **Criterio de confort.** Con la adopción de la ventana Extrugasa de la serie XP 60 TH, los valores de transmitancia térmica de ventana y vidrio son superiores a los límites establecidos por el estándar. Por lo tanto, no es necesario calcular U_w .
- **Criterios de eficiencia.** Se obtiene un valor de transmitancia térmica U de muro portante igual a 0,186W/m²K. El valor de la transmitancia térmica lineal es igual a 0,220W/mK.

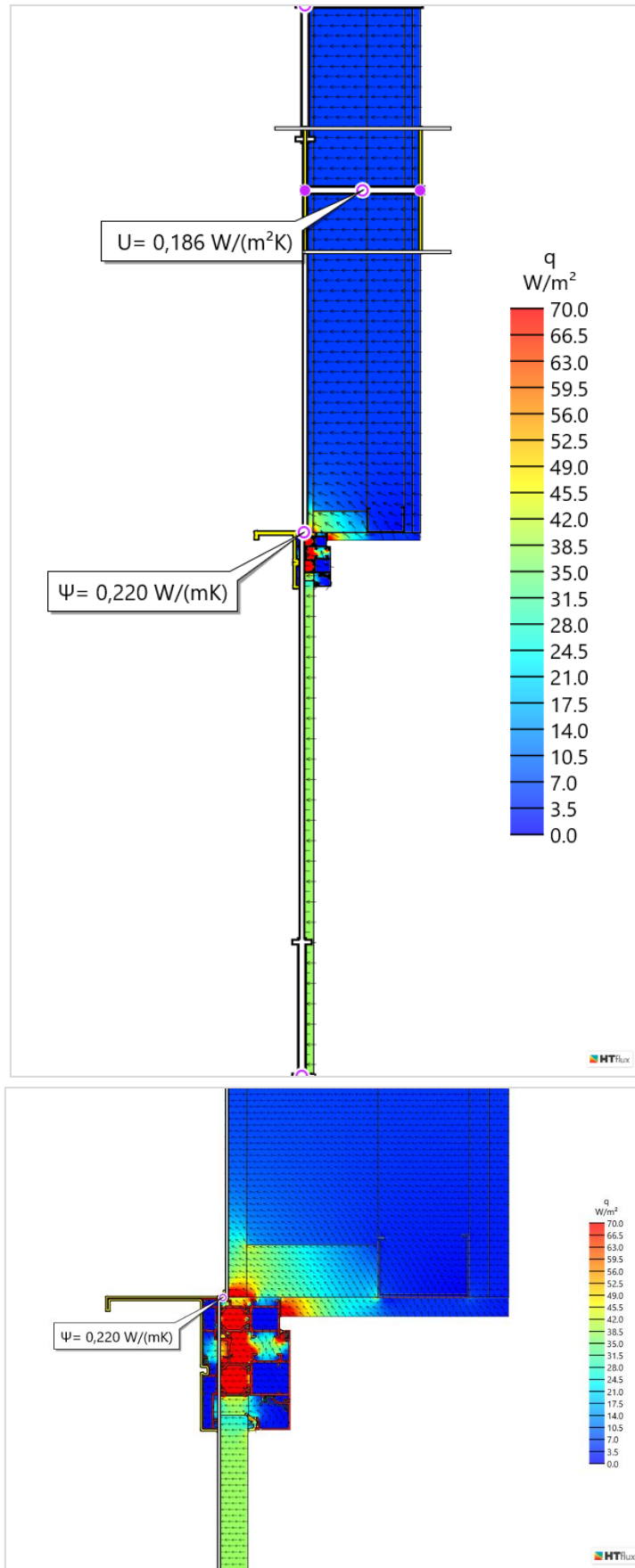


Figura 93. Transmitancias térmicas U y Ψ del encuentro EW2_OH1. Fuente: HTflux.

- **Criterios de humedad.** Se simula el detalle a partir del mes con las condiciones más desfavorable (enero) y por todo un año. No se detecta producción de condensación intersticial en ningún mes del año.

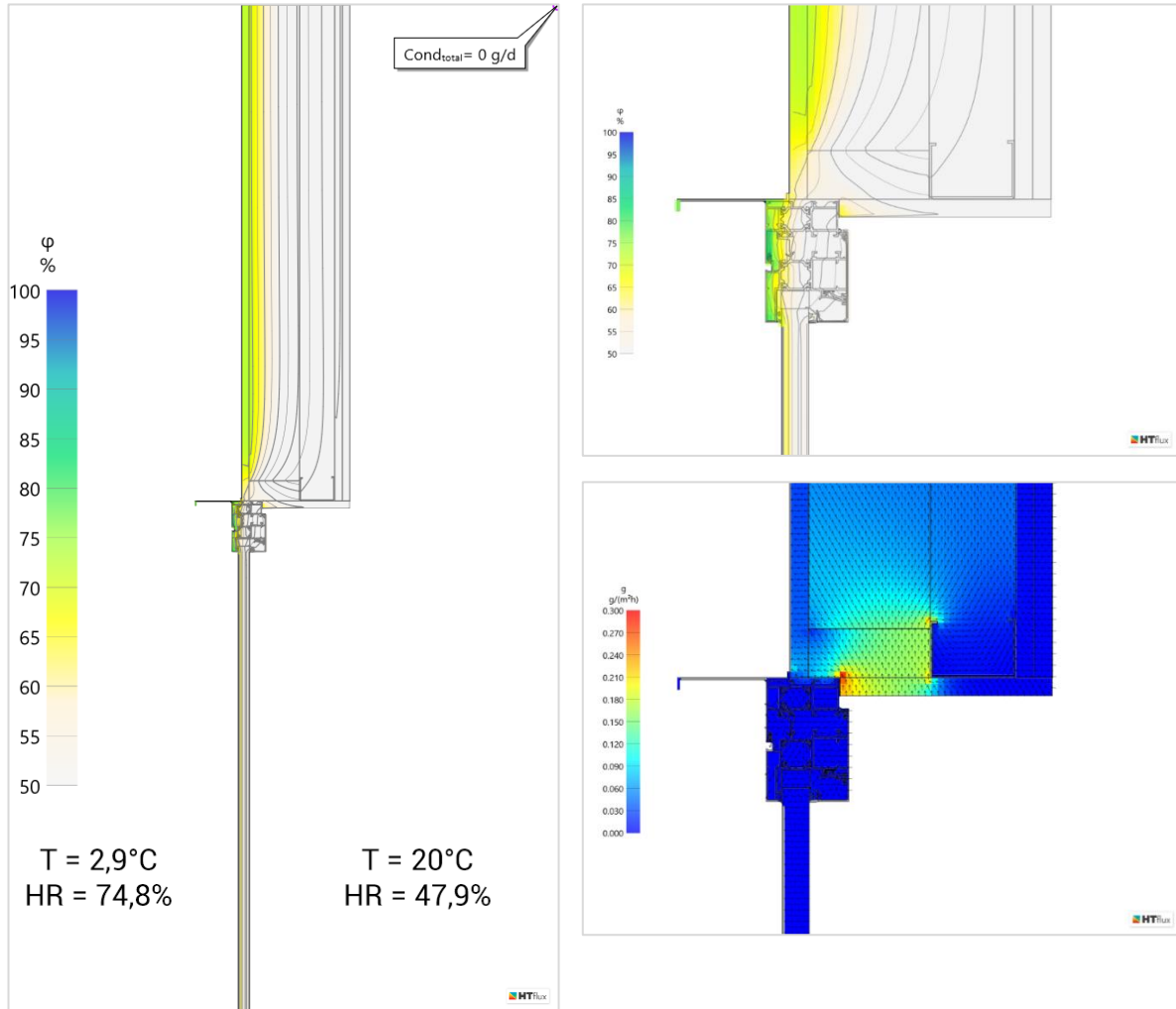


Figura 94. Humedad relativa y flujo de vapor en mes más desfavorable (enero) del encuentro EW2_OH1. Fuente: HTflux.

EW2_OJ1

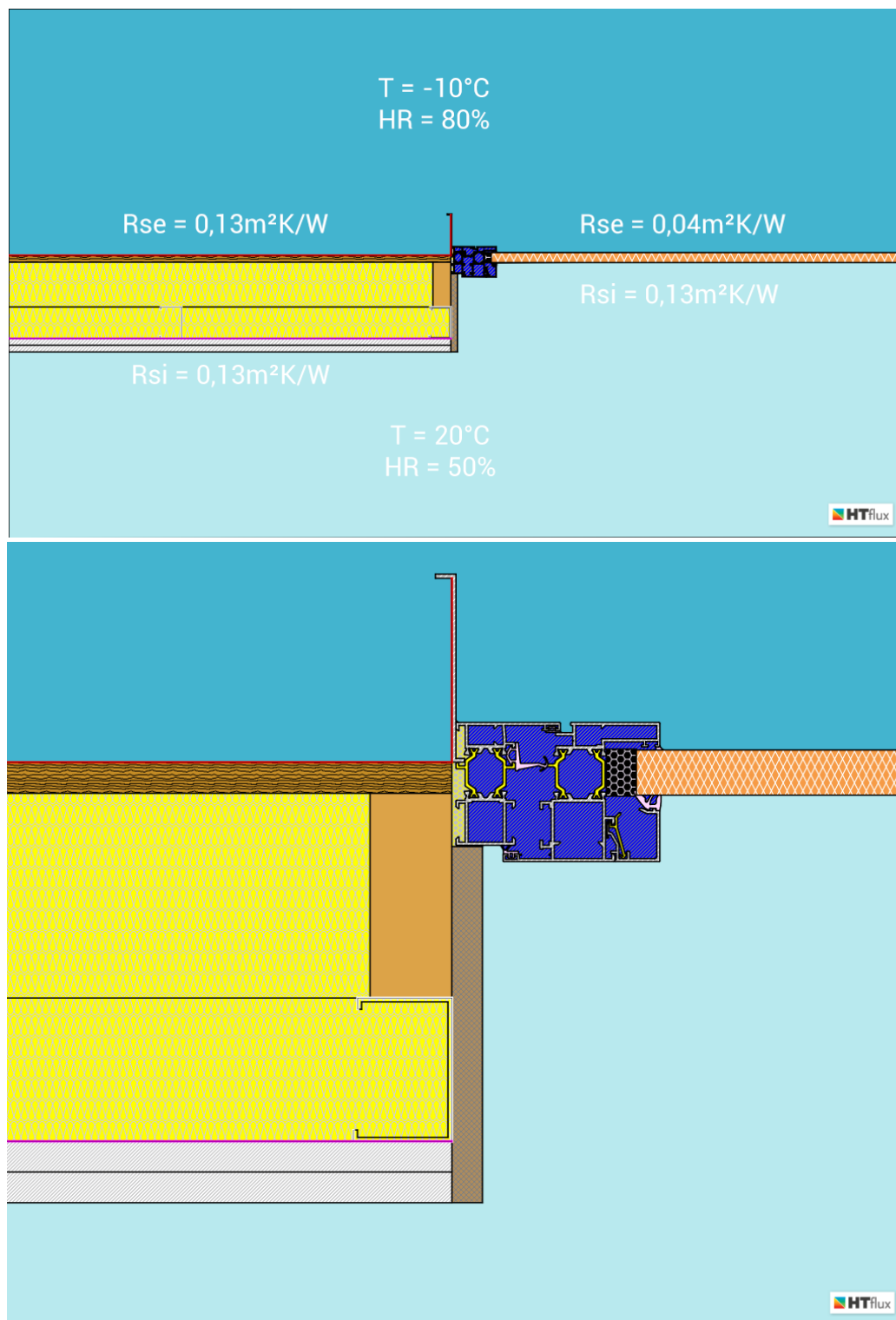


Figura 95. Condiciones de simulación del encuentro EW2_OJ1. Fuente: HTflux.

- **Criterio de higiene.** El punto más frío de este encuentro posee una temperatura de 5,2°C. A partir de este dato, se obtiene el factor de temperatura $f_{R_{si}=0,25m^2K/W}$:

$$f_{R_{si}=0,25m^2K/W} = \frac{T_{si} - T_e}{T_i - T_e} \quad f_{R_{si}=0,25m^2K/W} = \frac{5,2^\circ\text{C} - (-10^\circ\text{C})}{20^\circ\text{C} - (-10^\circ\text{C})} \quad f_{R_{si}=0,25m^2K/W} = 0,50$$

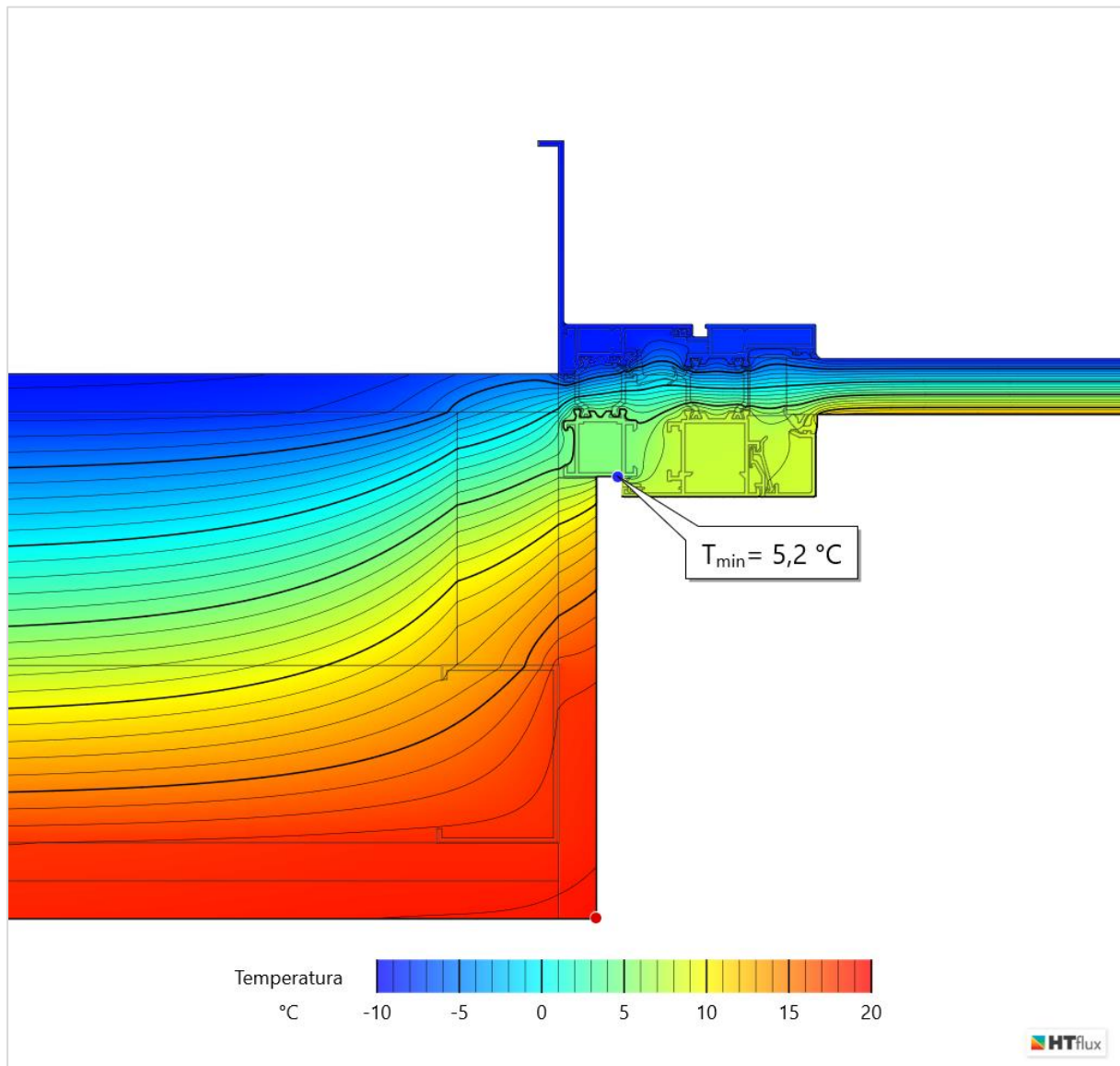


Figura 96. Temperatura superficial interior del encuentro EW2_OJ1. Fuente: HTflux.

- **Criterio de confort.** Con la adopción de la ventana Extrugasa de la serie XP 60 TH, los valores de transmitancia térmica de ventana y vidrio son superiores a los límites establecidos por el estándar. Por lo tanto, no es necesario calcular U_w .
- **Criterios de eficiencia.** Se obtiene un valor de transmitancia térmica U del muro portante igual a 0,189W/m²K en el área homogénea. El valor de la transmitancia térmica lineal es igual a 0,226W/mK.

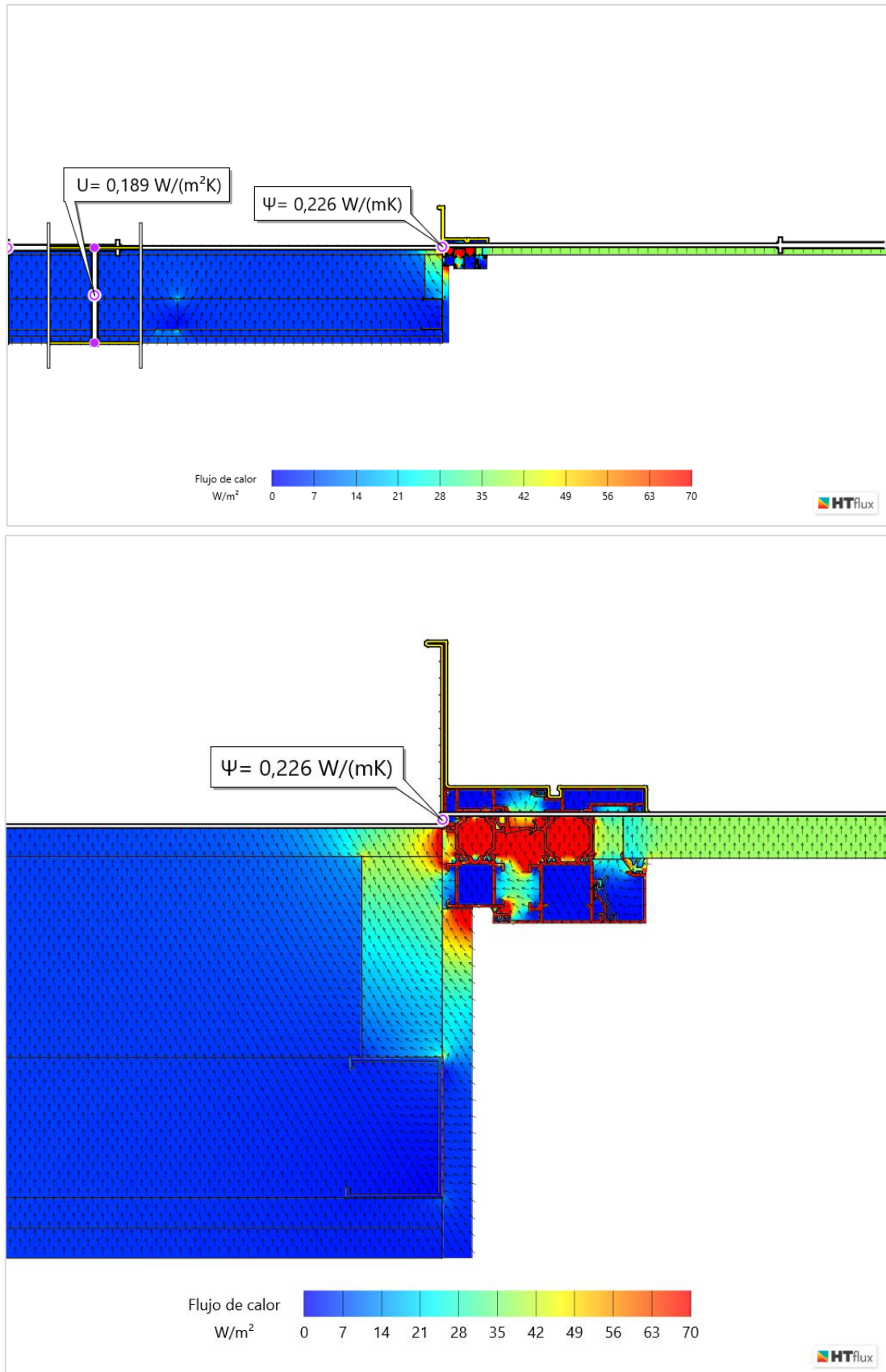


Figura 97. Transmitancias térmicas U y transmitancia térmica lineal Ψ del encuentro EW2_OJ1. Fuente: HTflux.

- **Criterios de humedad.** Se simula el detalle a partir del mes con las condiciones exteriores más desfavorable (enero) y por todo un año. No se detecta producción de condensación intersticial en ningún mes del año.

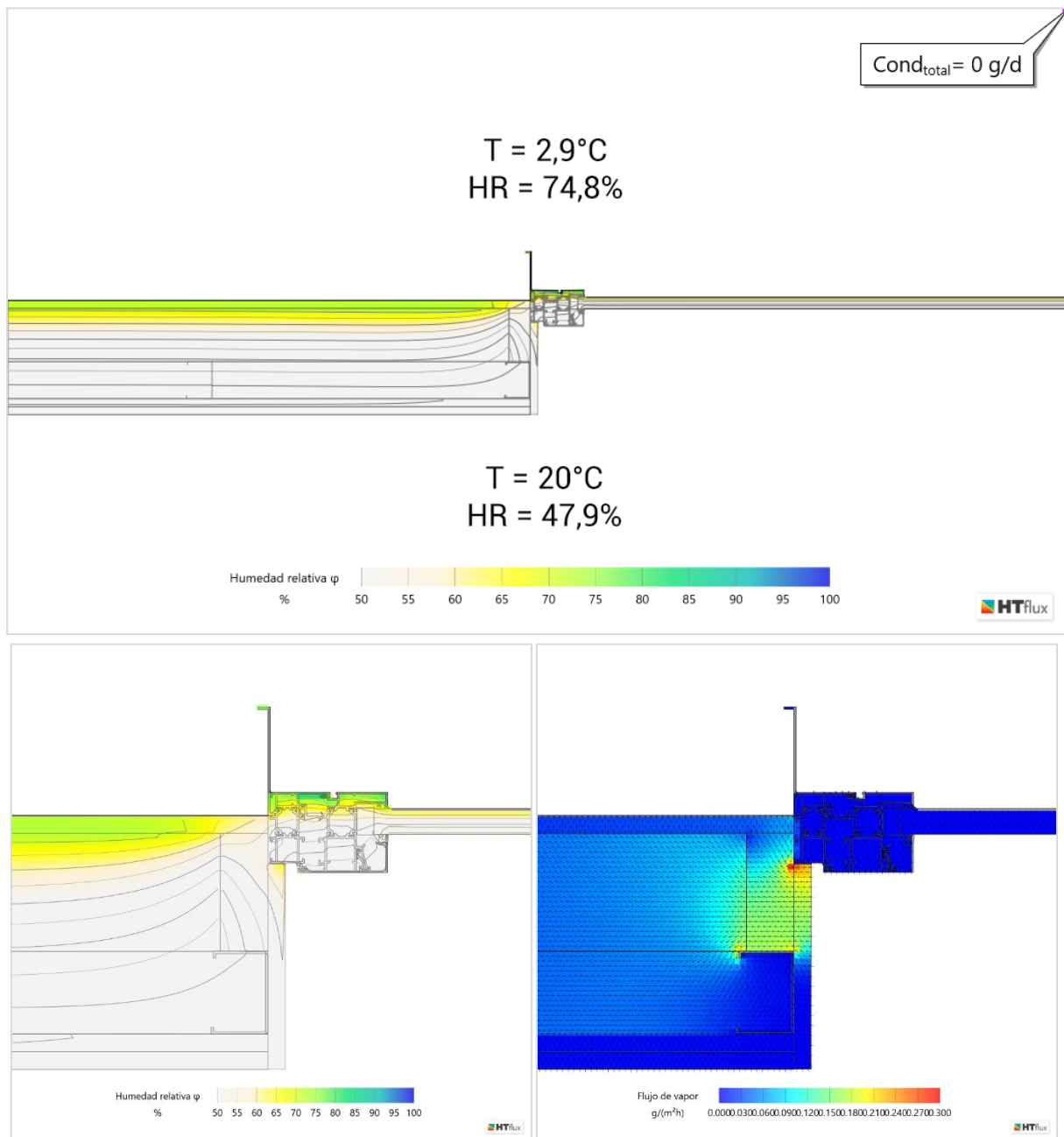


Figura 98. Humedad relativa y flujo de vapor en mes más desfavorable (enero) del encuentro EW2_OJ1.
Fuente: HTflux.

10.5. Encuentros con cubierta

EW1_R01-ve1

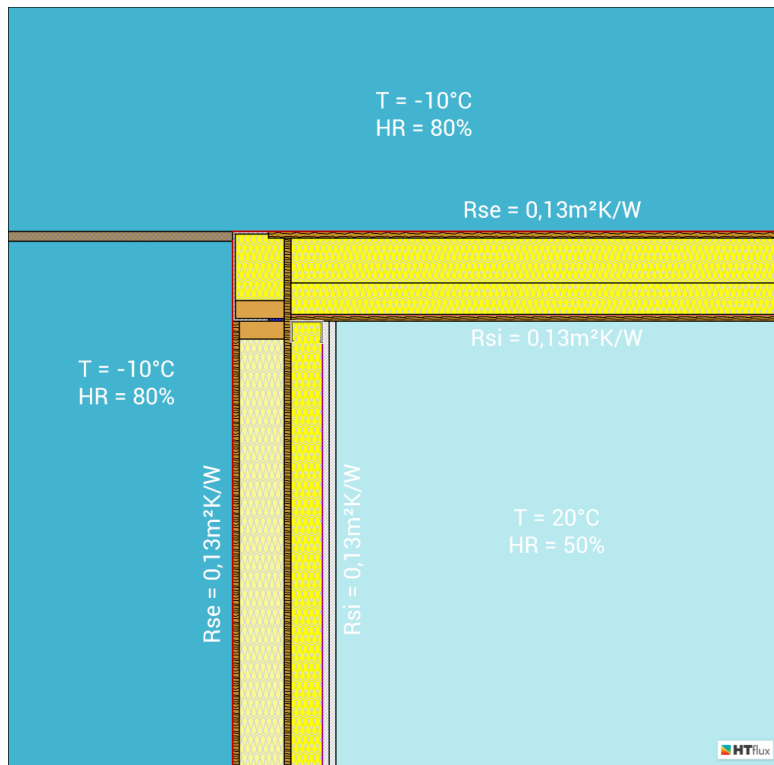


Figura 99. Condiciones de simulación del encuentro EW1_R01-ve1. Fuente: HTflux.

- **Criterio de higiene.** El punto más frío de este encuentro posee una temperatura de 14,1°C. A partir de este dato, se obtiene el factor de temperatura $f_{R_{si}=0,25m^2K/W}$:

$$f_{R_{si}=0,25m^2K/W} = \frac{T_{si} - T_e}{T_i - T_e} \quad f_{R_{si}=0,25m^2K/W} = \frac{14,1^\circ C - (-10^\circ C)}{20^\circ C - (-10^\circ C)} \quad f_{R_{si}=0,25m^2K/W} = 0,80$$

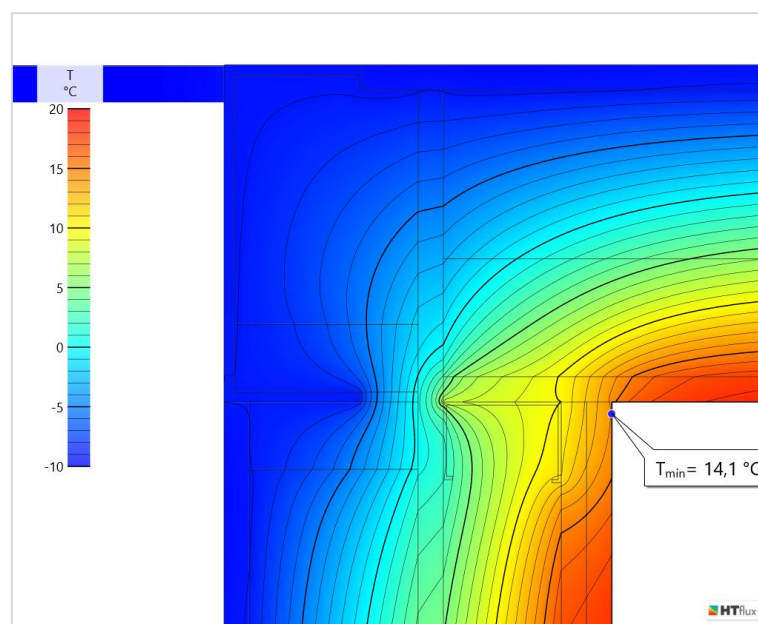


Figura 100. Temperatura superficial interior del encuentro EW1_R01-ve1. Fuente: HTflux.

- **Criterio de confort.** Dado que es un detalle estrictamente opaco, no existe carpintería en la que verificar el valor de la transmitancia térmica U de la ventana instalada.
- **Criterios de eficiencia.** Se obtiene un valor de transmitancia térmica U de la fachada hastial igual a $0,188 \text{ W/m}^2\text{K}$ e igual valor de transmitancia térmica en la cubierta. El valor de la transmitancia térmica lineal es igual a $-0,004 \text{ W/mK}$. Al tratarse de un encuentro estrictamente opaco, se determina el valor del factor de temperatura, que es igual al calculado en el criterio de higiene, esto es, un factor de temperatura f_{Rsi} de 0,80.

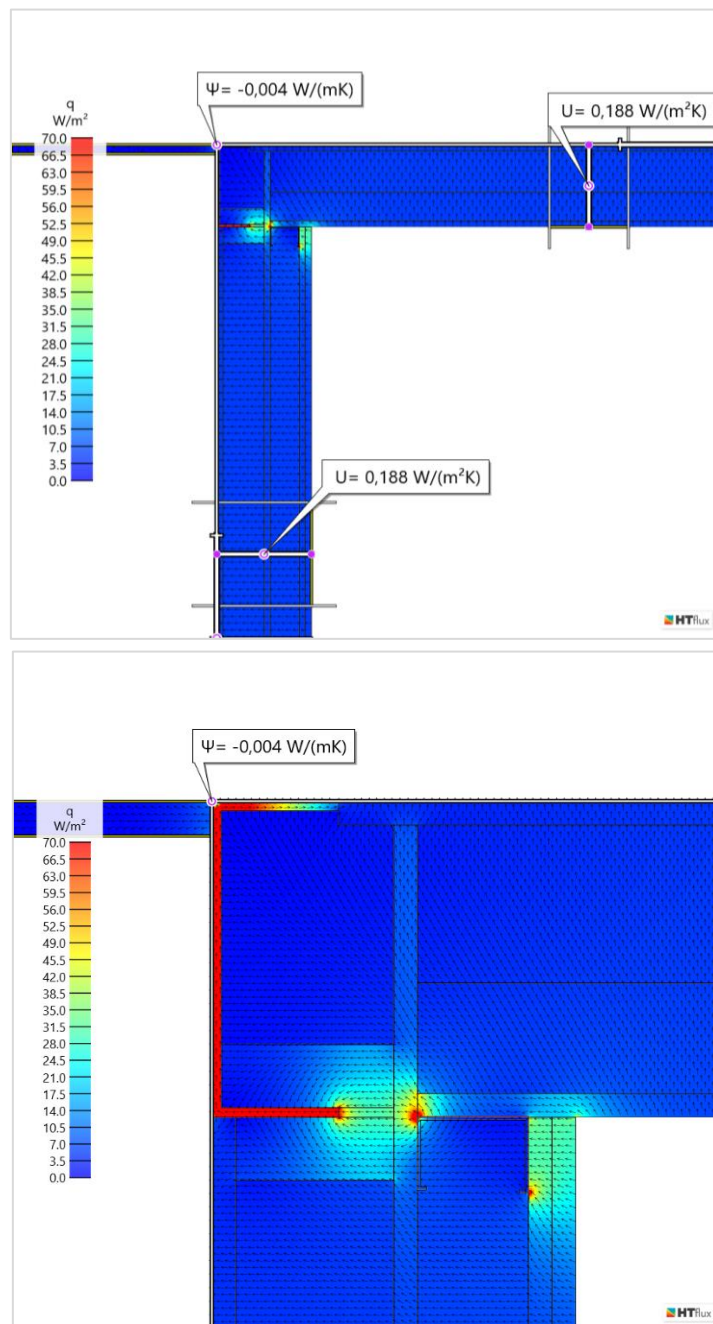


Figura 101. Transmitancias térmicas U y Ψ del encuentro EW1_R01-ve1. Fuente: HTflux.

- **Criterios de humedad.** Se simula el detalle a partir del mes con las condiciones exteriores más desfavorable (enero) y por todo un año. No se detecta producción de condensación intersticial en ningún mes del año.

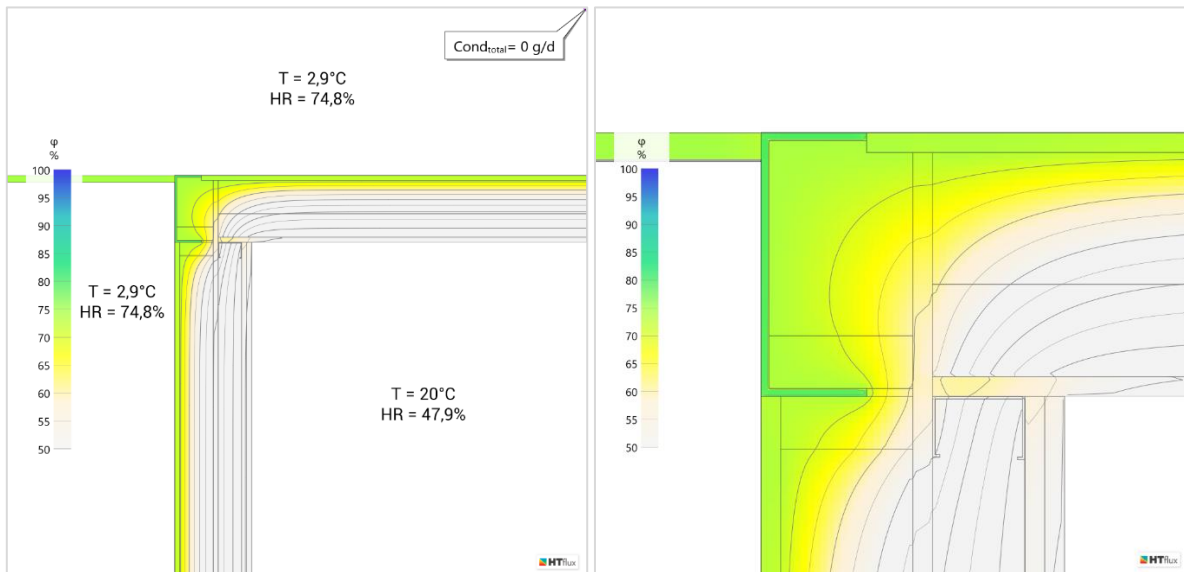


Figura 102. Humedad relativa en mes más desfavorable (enero) del encuentro EW1_R01-ve1. Fuente: HTflux.

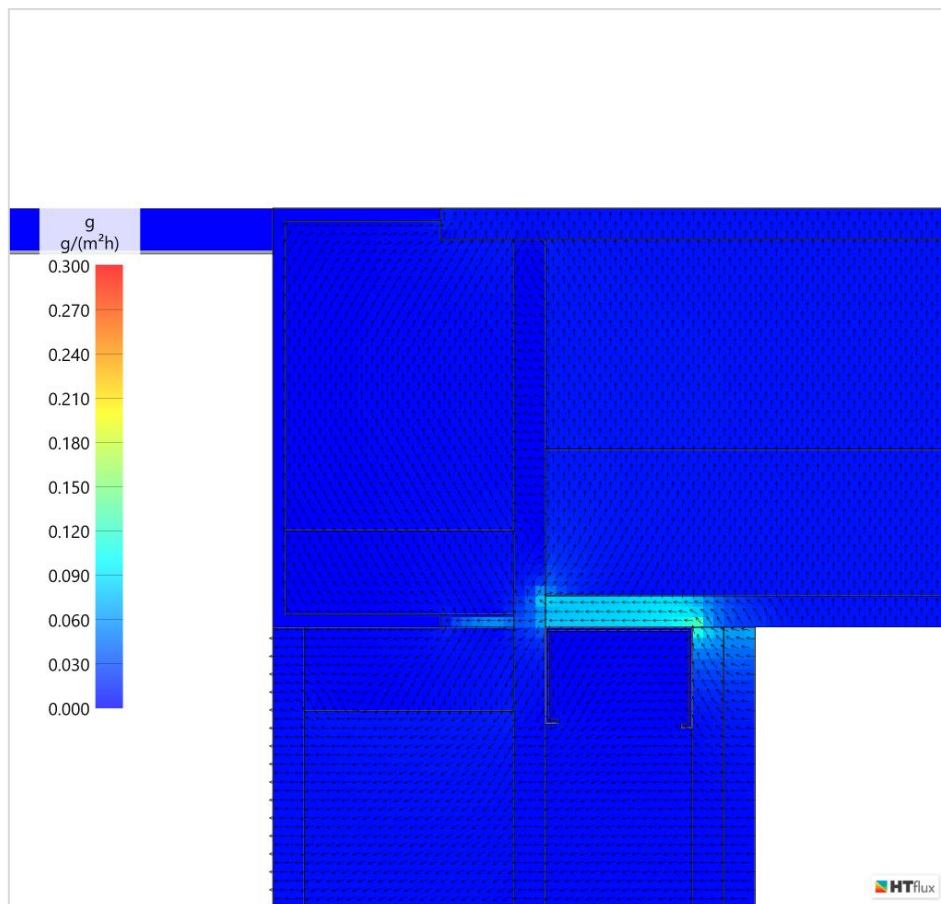


Figura 103. Flujo de vapor en mes más desfavorable (enero) del encuentro EW1_R01-ve1. Fuente: HTflux.

EW2_R01

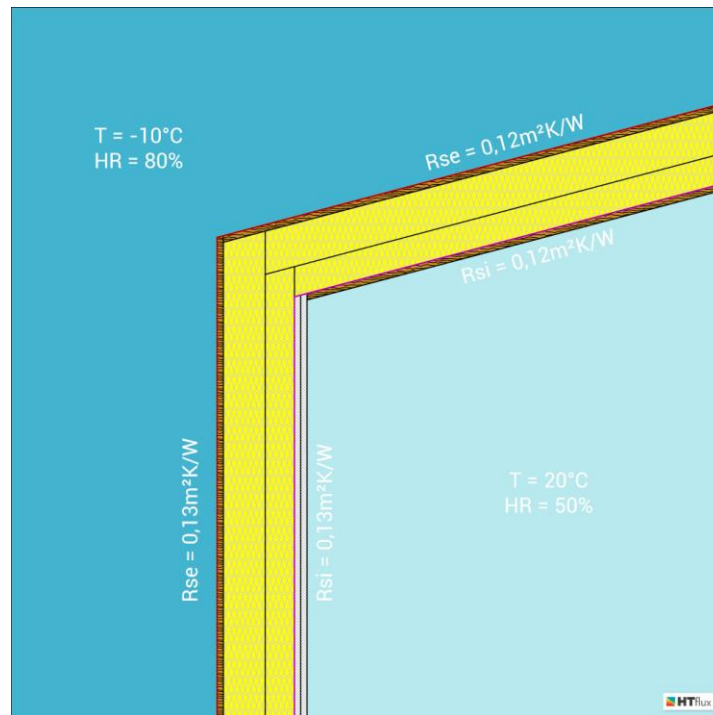


Figura 104. Condiciones de simulación del encuentro EW2_R01. Fuente: HTflux.

- **Criterio de higiene.** El punto más frío de este encuentro posee una temperatura de 17°C. A partir de este dato, se obtiene el factor de temperatura $f_{R_{si}=0,25m^2K/W}$:

$$f_{R_{si}=0,25m^2K/W} = \frac{T_{si} - T_e}{T_i - T_e} \quad f_{R_{si}=0,25m^2K/W} = \frac{17^{\circ}\text{C} - (-10^{\circ}\text{C})}{20^{\circ}\text{C} - (-10^{\circ}\text{C})} \quad f_{R_{si}=0,25m^2K/W} = 0,90$$

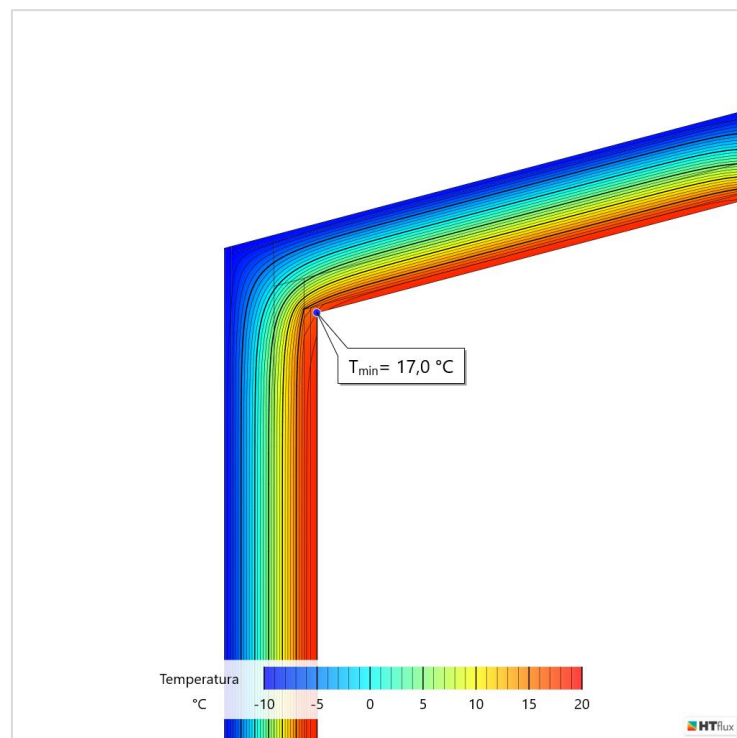


Figura 105. Temperatura superficial interior del encuentro EW2_R01. Fuente: HTflux.

- **Criterio de confort.** Dado que es un detalle estrictamente opaco, no existe carpintería en la que verificar el valor de la transmitancia térmica U de la ventana instalada.
- **Criterios de eficiencia.** Se obtiene un valor de transmitancia térmica U de muro portante igual a $0,186\text{W}/\text{m}^2\text{K}$, y un valor de U de $0,188\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ en la cubierta. La transmitancia térmica lineal producida es igual a 0 , ya que no existe puente térmico en este encuentro. Al tratarse de uno estrictamente opaco, se determina el valor del factor de temperatura, que es igual al calculado en el criterio de higiene, esto es, un factor de temperatura f_{RSi} de $0,90$.

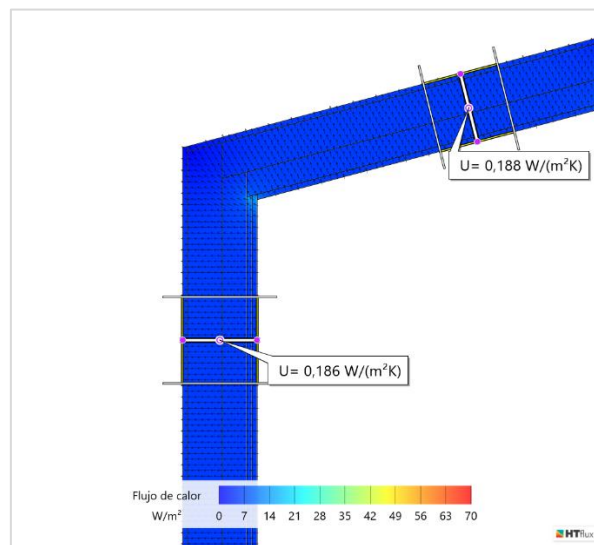


Figura 106. Transmitancias térmicas del encuentro EW2_R01. Fuente: HTflux.

- **Criterios de humedad.** Se simula el detalle a partir del mes con las condiciones más desfavorable (enero) y por todo un año. No se detecta producción de condensación intersticial en ningún mes del año.

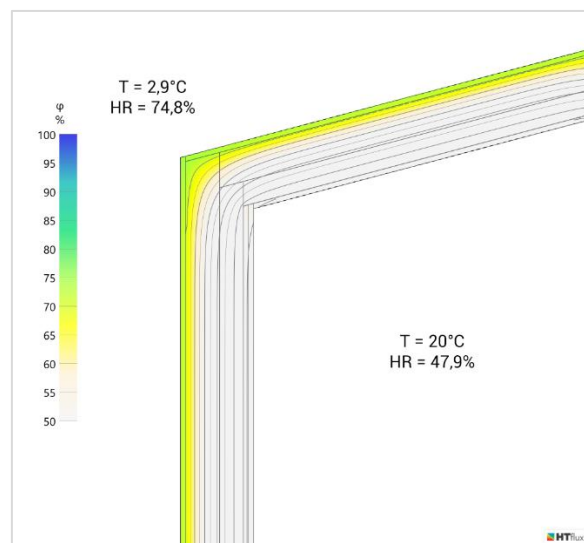


Figura 107. Humedad relativa en mes más desfavorable (enero) del encuentro EW2_R01. Fuente: HTflux.

RO1_R01

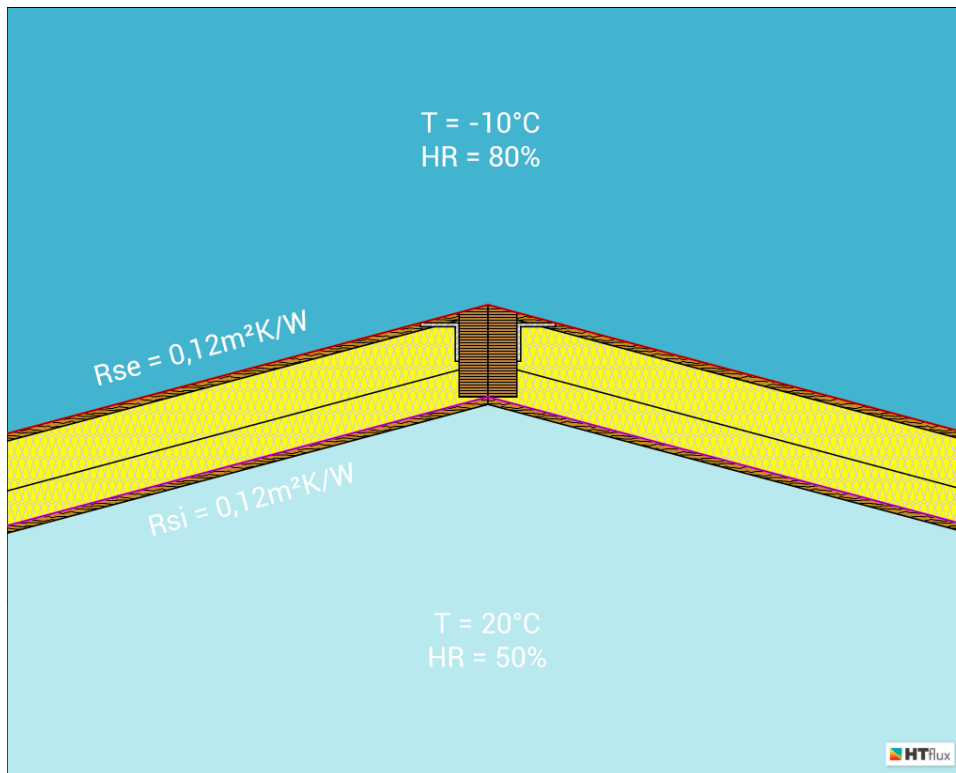


Figura 108. Condiciones de simulación del encuentro R01_R01. Fuente: HTflux.

- **Criterio de higiene.** El punto más frío de este encuentro posee una temperatura de 13,8°C. A partir de este dato, se obtiene el factor de temperatura $f_{R_{si}=0,25m^2K/W}$:

$$f_{R_{si}=0,25m^2K/W} = \frac{T_{si} - T_e}{T_i - T_e} \quad f_{R_{si}=0,25m^2K/W} = \frac{13,8^\circ\text{C} - (-10^\circ\text{C})}{20^\circ\text{C} - (-10^\circ\text{C})} \quad f_{R_{si}=0,25m^2K/W} = 0,79$$

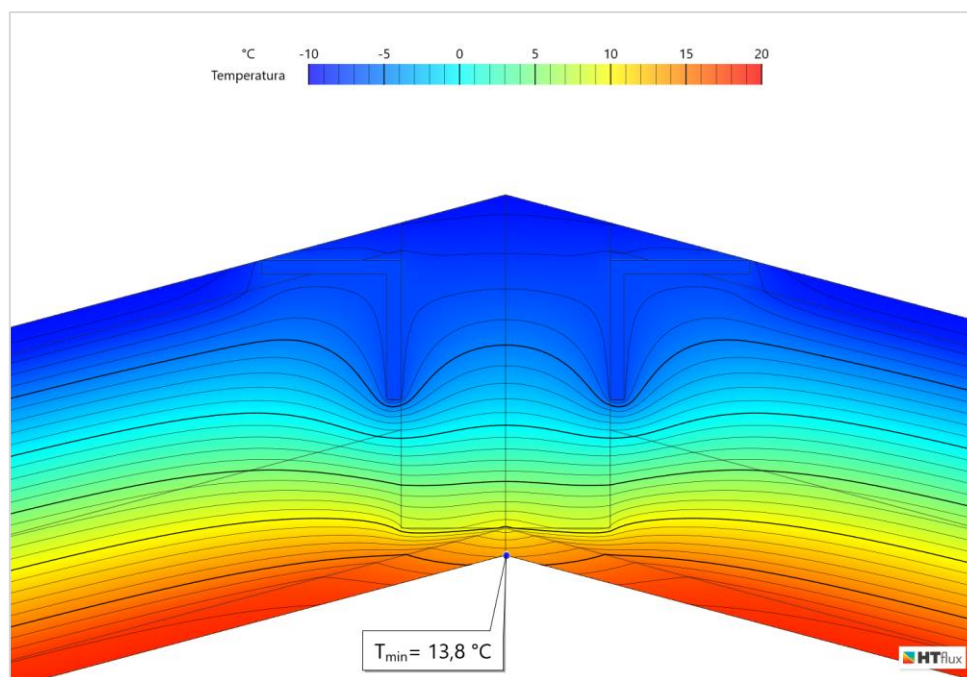


Figura 109. Temperatura superficial interior del encuentro R01_R01. Fuente: HTflux.

- **Criterio de confort.** Dado que es un detalle estrictamente opaco, no existe carpintería en la que verificar el valor de la transmitancia térmica U de la ventana instalada.
- **Criterios de eficiencia.** Se obtiene un valor de transmitancia térmica U de cubierta igual a $0,188\text{W}/\text{m}^2\text{K}$. La transmitancia térmica lineal es igual a $0,073\text{W}/\text{mK}$. Al tratarse de un encuentro estrictamente opaco, se determina el valor del factor de temperatura, que es igual al calculado en el criterio de higiene, esto es, un factor de temperatura f_{Rsi} de $0,79$.

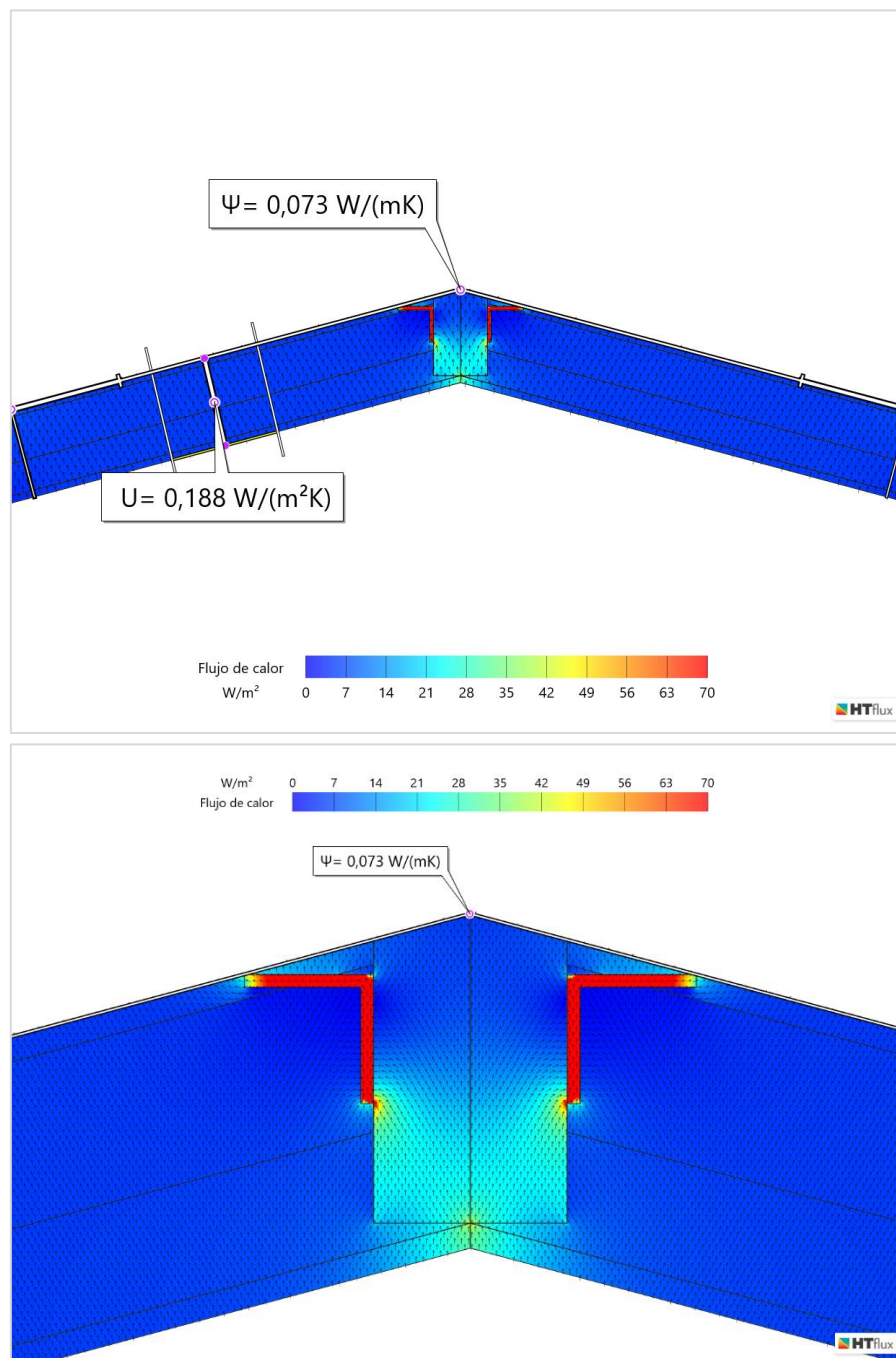


Figura 110. Transmitancias térmicas U y Ψ del encuentro RO1_RO1. Fuente: HTflux.

- **Criterios de humedad.** Se simula el detalle a partir del mes con las condiciones más desfavorable (enero) y por todo un año. No se detecta producción de condensación intersticial en ningún mes del año.

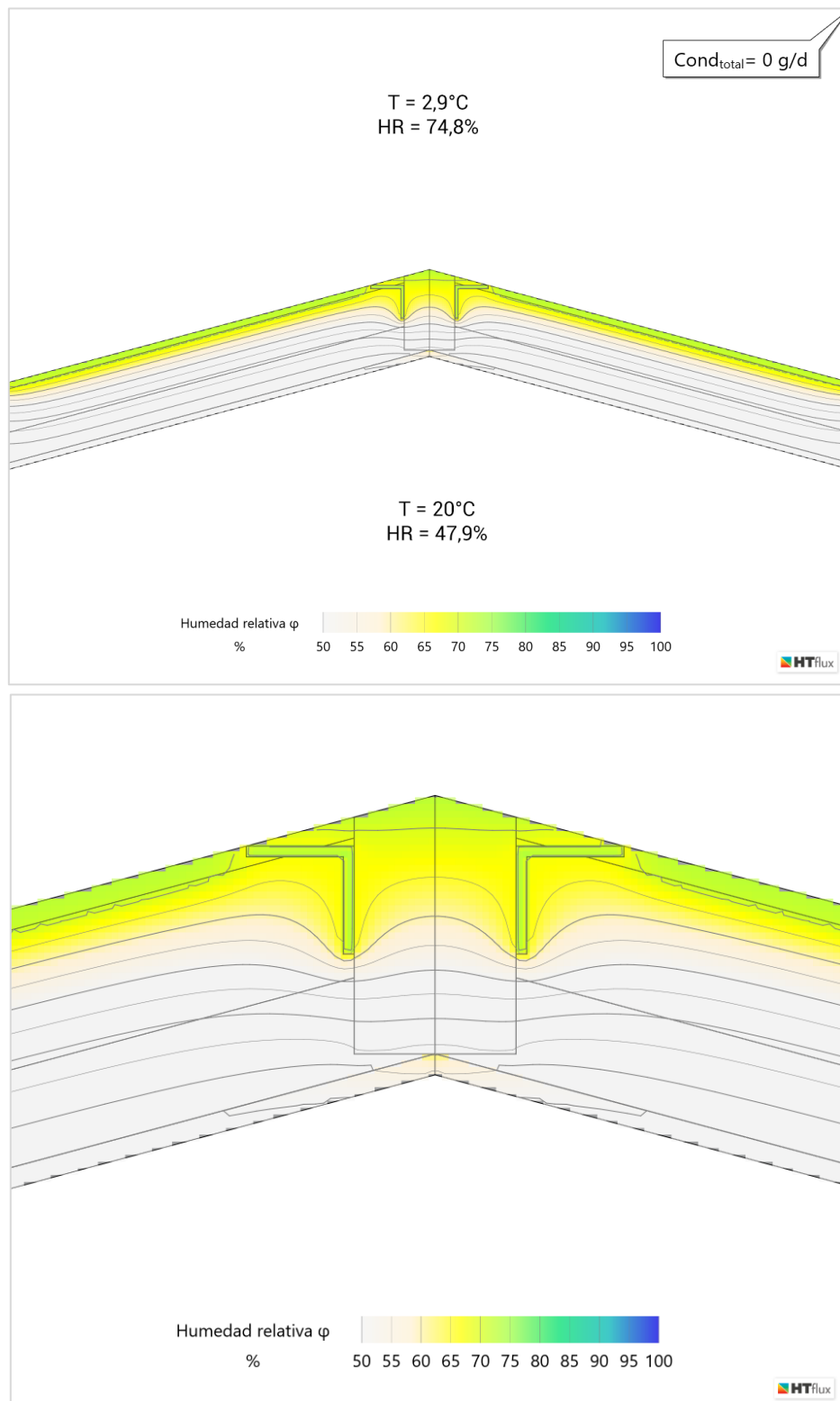


Figura 111. Humedad relativa en mes más desfavorable (enero) del encuentro R01_R01. Fuente: HTflux.

11. Comparación de resultados parciales con el estándar Passivhaus

La Tabla 17 presenta el comportamiento higrotérmico del sistema constructivo modular de aluminio extrusionado a partir de la simulación de flujo de calor y difusión de vapor de los catorce detalles evaluables.

Encuentro	Criterio de higiene	Criterio de confort	Criterios de eficiencia			Criterios de humedad		
	$f_{Rsi} \geq$	U ventana instalada \leq	U del componente exterior	Detalles opacos $f_{Rsi} \geq$	Ausencia de puentes térmicos $\Psi_a \leq$	Condensación	M_a límite según DIN EN ISO 13788 \leq	
	[-]	[W/m ² K]	[W/m ² K]	[-]	[W/mK]	[-]	[g/m ²]	
	Estándar PH	0,65	1,05 (0,90)	0,25	0,82	0,010	sin cond. 12 meses	200
1	EW1_EW2-ec1	0,83	-	0,183	0,83	-0,017	✓	✓
2	FS1_EW1	0,87	-	0,188	0,87	-0,043	✓	✓
3	FS1_EW2	0,87	-	0,186	0,87	-0,045	✓	✓
4	EW1_EW1_CE1	0,82	-	0,187	0,82	0,068	✗	✗
5	EW2_EW2_CE1	0,88	-	0,186	0,88	0,026	✓	✓
6	EW1_OB1	0,59	1,94 (1,1)*	0,188	-	0,352**	✓	✓
7	EW1_OH1	0,56	1,94 (1,1)*	0,188	-	0,254**	✓	✓
8	EW1_OJ1	0,51	1,94 (1,1)*	0,185	-	0,273**	✓	✓
9	EW2_OB1	0,56	1,94 (1,1)*	0,186	-	0,347**	✓	✓
10	EW2_OH1	0,50	1,94 (1,1)*	0,186	-	0,220**	✓	✓
11	EW2_OJ1	0,50	1,94 (1,1)*	0,189	-	0,226**	✓	✓
12	EW1_RO1-ve1	0,80	-	0,188	0,80	-0,004	✓	✓
13	EW2_RO1	0,90	-	0,188	0,90	0	✓	✓
14	RO1_RO1	0,79	-	0,188	0,79	0,073	✓	✓

*Transmitancia de ventana según ficha técnica de producto, no de ventana instalada.
 **En encuentros con carpintería, no se exige el cumplimiento de esta exigencia.

Tabla 17. Comportamiento higrotérmico de sistema constructivo y comparación con estándar Passivhaus. Fuente: elaboración propia en base a resultados de simulación con HTflux.

- **Criterio de higiene.** Se satisface en ocho de los catorce encuentros, siendo los seis encuentros con ventana instalada los que presentan mayor dificultad de cumplimiento. Se obtiene un f_{Rsi} con rangos que van desde 0,50 en encuentros con jambas a 0,59 en encuentros con alféizar de ventana en fachada hastial. Con una temperatura interior de 20°C, una exterior de -10°C y un factor de temperatura mínimo exigido de 0,65, se requiere que la temperatura superficial interior sea igual o superior a los 9,5°C, condición que no se satisface en ninguno de estos detalles. La temperatura superficial interior promedio detectada en estos detalles es de 6,2°C, una diferencia de 3,3°C con la mínima requerida.

- **Criterio de confort.** Ningún encuentro con ventana instalada cumple este criterio, dado que la transmitancia térmica de la carpintería utilizada en la simulación, que es la carpintería hoy en día utilizada en obras construidas con este sistema constructivo, no está dentro de los valores máximos aceptados.
- **Criterios de eficiencia.** En todos los encuentros, todos los cerramientos opacos cumplen con los valores máximos **de transmitancia térmica U**. Se obtuvo un valor de $0,18\text{W/m}^2\text{K}$, inferior al límite de $0,25\text{W/m}^2\text{K}$. No se observaron diferencias notorias entre el comportamiento térmico de la fachada hastial y del muro portante.

Seis de los ocho encuentros estrictamente opacos satisfacen el valor mínimo de **factor de temperatura f_{Rsi}** requerido en este tipo de detalle. Con una temperatura interior de 20°C , una exterior de -10°C y un factor de temperatura mínimo exigido de $0,82$, se requiere que la temperatura superficial interior sea igual o superior a los $14,6^\circ\text{C}$. Sin embargo, en el encuentro de fachada hastial con cubierta (EW1_RO1-ve1) y en la cumbrera (RO1_RO1), se obtienen temperaturas superficiales interiores de $14,1^\circ\text{C}$ y $13,8^\circ\text{C}$, respectivamente.

Además, cinco de los ocho encuentros opacos evaluados poseen un valor de **transmitancia térmica lineal Ψ** que cumplen con el máximo establecido. Este requisito no se cumple en los dos encuentros con forjado (EW1_EW1_CE1 y EW2_EW2_CE2) y en la cumbrera (RO1_RO1). En relación a los puentes térmicos en encuentros con ventana instalada, vale recordar que el estándar Passivhaus permite certificar un sistema constructivo incluso si no se obtienen transmitancias térmicas lineales iguales o menores a $0,010\text{W/mK}$. Por lo tanto, el límite de $0,010\text{W/mK}$ no es un requisito a cumplir en esos detalles.

- **Criterios de humedad.** Solo en uno de los detalles simulados se detecta producción de condensación intersticial: el encuentro de la fachada hastial con el forjado (EW1_EW1_CE1). Mediante la simulación no se detecta que dicha condensación se evapore en períodos estivales, pero tampoco es posible determinar la cantidad de condensación producida por metro cuadrado. En cambio, el software revela la acumulación diaria de vapor condensado dentro de los límites simulados. La Tabla 18 expresa las cantidades detectadas en la simulación de cada mes del año.

Mes	Condens.	
	g/d	g/mes
ENE	0,551	17,081
FEB	0,38	10,64
MAR	0,18	5,58
ABR	0	0
MAY	0	0
JUN	0	0
JUL	0	0
AGO	0	0
SEP	0	0
OCT	0	0
NOV	0,231	6,93
DIC	0,499	15,469

Tabla 18. Producción de condensación en el encuentro EW1_EW1_CE1. Fuente: HTflux.

Los resultados obtenidos pueden resumirse de la siguiente manera:

- Los encuentros con carpinterías son los que presentan mayor dificultad para cumplir con las exigencias de higiene y confort.
- Todos los componentes opacos satisfacen los requerimientos referidos a la transmitancia térmica U.
- La cumbrera y el encuentro de fachada hastial con cubierta no satisfacen el valor mínimo de factor de temperatura f_{Rsi} . Cabe mencionar que este último detalle sí cumple con el valor límite de transmitancia térmica lineal.
- El encuentro de fachada hastial con forjado, el de muro portante con forjado y el de cumbrera presentan puentes térmicos con valores de transmitancia térmica lineal Ψ por encima del límite permitido por el estándar.
- Solo el encuentro de fachada hastial con forjado no cumple con los criterios de humedad.

Por lo expuesto, las modificaciones que se hagan sobre el sistema constructivo deben estar orientadas a disminuir los valores de transmitancia térmica lineal de los puentes térmicos, como así también a optimizar el desempeño higrotérmico de los encuentros con ventana, partiendo de la selección de una carpintería que sí cumpla con las exigencias del estándar Passivhaus. Adicionalmente, se debe modificar el encuentro de fachada hastial con forjado para evitar la producción de condensación intersticial.

Para determinar cuáles son las soluciones más adecuadas para mejorar el comportamiento higrotérmico del sistema constructivo, se parte del estudio del flujo de calor de los detalles que requieren modificaciones, aspecto que se aborda en el capítulo siguiente de este trabajo.

12. Modificación del sistema constructivo

12.1. Criterio de confort: cambio de ventana instalada

Para analizar el flujo de calor que se produce en los encuentros de muro con ventana, se escoge el encuentro de alféizar con fachada hastial y de alféizar con muro portante.

En fachada hastial tiene una gran influencia en la transmisión de calor la presencia del perfil U de aluminio, como así también la existencia de la subestructura metálica del acabado interior. Al tratarse de elementos hechos con materiales de alta conductividad térmica, actúan como las bases del puente térmico que conduce el calor del interior al exterior. De igual manera, dado que la ventana también está fabricada con un material de alta conductividad térmica, se constituye como el puente que conduce el calor del perfil metálico del interior al perfil metálico del exterior. La ruptura de puente térmico mediante perfiles de poliamida que ocurre al interior de la carpintería no resulta suficiente para lograr que la transmisión de calor por el marco alcance valores de transmitancia térmica compatibles con el estándar Passivhaus.

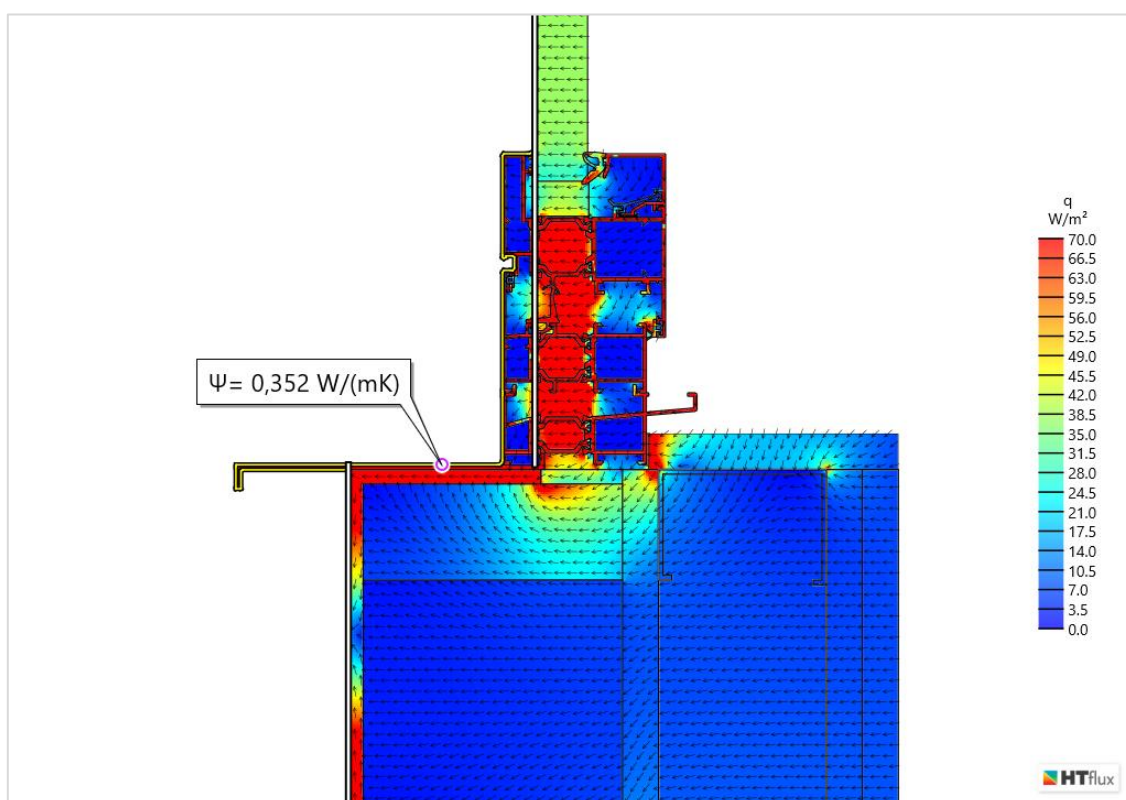


Figura 112. Flujo de calor en encuentro de fachada hastial con alféizar (EW1_OB1). Fuente: HTflux.

En la simulación del encuentro de alféizar con muro portante, no se tuvo en cuenta la influencia del panel de aluminio extrusionado del exterior (dado que desprecia la resistencia térmica de la fachada ventilada), y el perfil metálico de la subestructura del acabado interior no se encuentra en contacto estrecho con el marco de la carpintería. Por lo tanto, la transmisión de calor no ocurre de igual manera que en el detalle en fachada hastial. Esto no significa que el perfil metálico del acabado interior no tenga

influencia, pero la mayor concentración de flujo calorífico se encuentra en los puntos de contacto de la carpintería con el OSB exterior y el tablero de madera cemento del alféizar. Estos puntos de contacto no poseen el aislamiento térmico suficiente para reducir la transmisión de calor hacia el exterior.

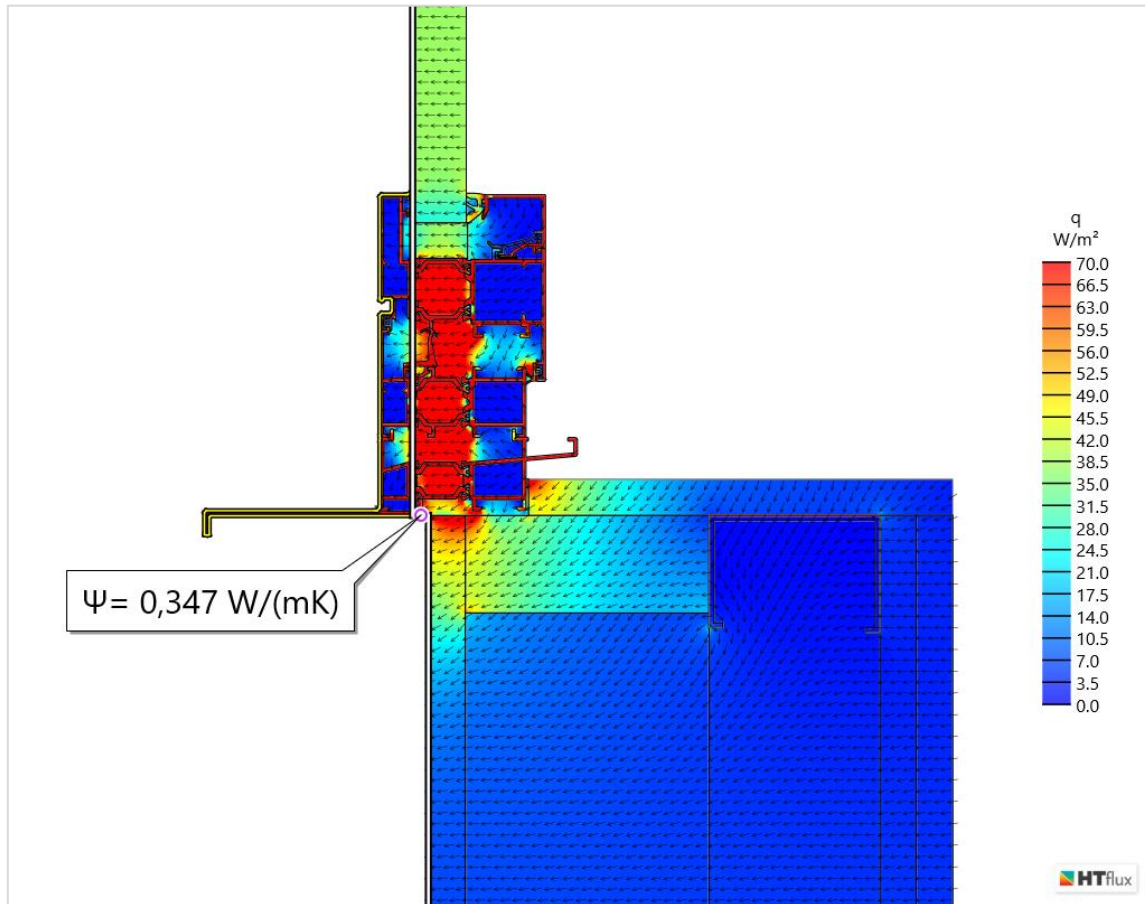


Figura 113. Flujo de calor en encuentro de muro portante con alféizar (EW2_OB1). Fuente: HTflux.

A partir del análisis de ambos encuentros, y por extensión en los demás encuentros con carpintería, se entiende que la reducción de las pérdidas de energía térmica debe girar en torno a la separación de la carpintería de los elementos metálicos, y al aislamiento de esta de los elementos estructurales o de acabado en torno al marco.

En ambos encuentros, y en general en todos los encuentros con carpintería, no es despreciable la transmisión de calor que ocurre a través del vidrio, que también contribuye en que la transmitancia térmica lineal sea elevada.

En la ecuación que determina el valor de la transmitancia térmica de una ventana instalada en clima cálido templado:

$$U_w = \frac{A_g \times U_g + A_f \times U_f + L_g \times \Psi_g + L_w \times \Psi_w}{A_w} \leq 1,05 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Se observa que intervienen los siguientes factores:

- La superficie del vidrio (A_g) y la del marco (A_f).
- La transmitancia térmica del vidrio (U_g) y la del marco (U_f).
- La transmitancia térmica lineal producido en el encuentro entre marco y vidrio (Ψ_g).
- La longitud del encuentro entre marco y vidrio (L_g).
- La transmitancia térmica lineal producido en el encuentro entre marco y muro (Ψ_w).
- La longitud del encuentro entre marco y muro (L_w).
- El área de la ventana (A_w).

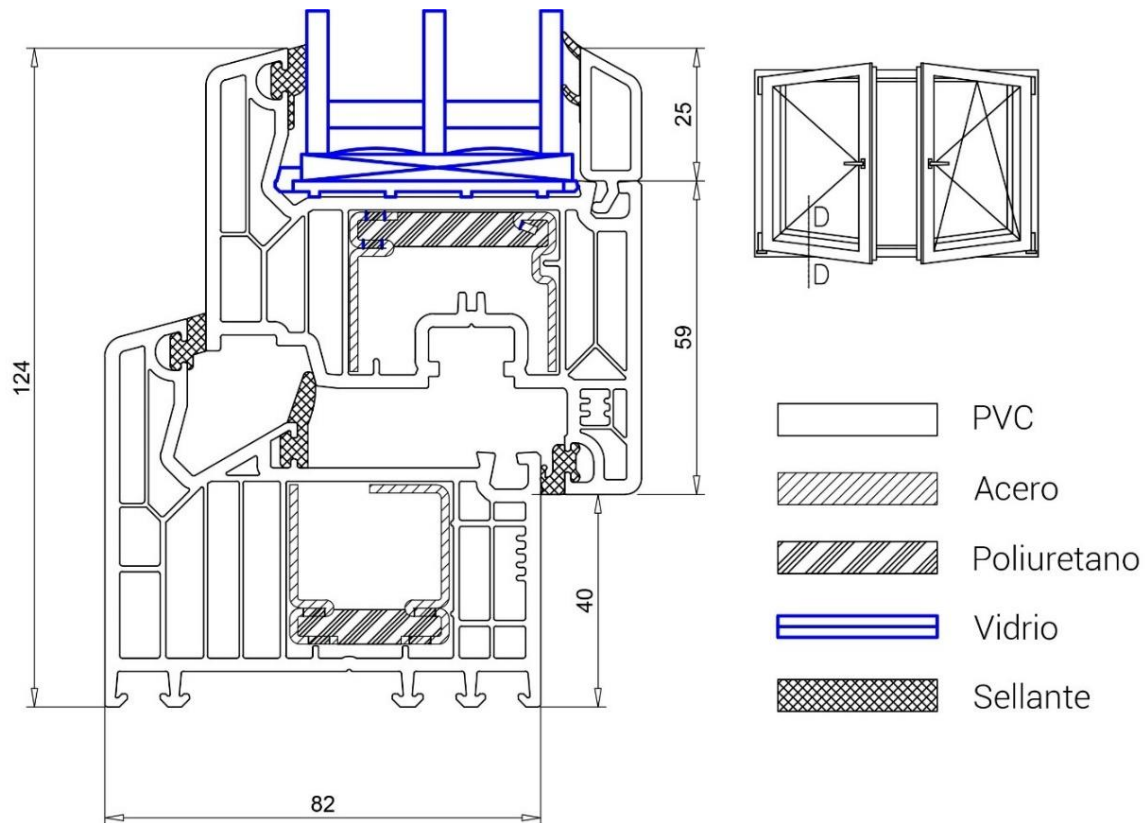
Esto significa que no basta con lograr optimizar el encuentro propiamente dicho entre la ventana y el cerramiento opaco (Ψ_w), sino que es preciso que la propia ventana tenga unas prestaciones térmicas de muy alta calidad (transmitancias U_g y U_f muy bajas).

Como ya se mencionó en capítulos anteriores, una manera de asegurar esa alta calidad es utilizar componentes que hayan sido evaluados según el estándar Passivhaus y aprobados para su uso en edificios construidos conforme a dicho estándar. En la clasificación de componentes constructivos certificados, se observó que existen componentes específicos para uso en envolvente transparente, dentro de los cuales encontramos marcos, vidrios, intercalarios y sellantes. Entonces, se deben seleccionar aquellos componentes que sean adecuados para cumplir con los requerimientos del estándar en clima cálido templado.

A junio de 2022, existen en total 40 marcos de ventana certificados para clima cálido templado según el estándar Passivhaus para componentes transparentes.¹² Existen opciones fabricadas en aluminio, en PVC, en madera o en una combinación de madera y aluminio. A efectos de analizar la optimización de los encuentros con carpintería del sistema constructivo en estudio, se adopta el marco de ventana SL82 Passiv 1.0 de la empresa Vekoplast Ibérica S.A.U. Se trata de un marco de ventana fabricado en PVC, reforzado con acero con rotura de puente térmico de poliuretano de conductividad térmica 0,25W/mK.¹³

¹² Passivhaus Institut, "Component Database: Windows", Passive House, consultado el 19 de junio de 2022. <https://database.passivehouse.com/en/components/list/window?lat=40.6818&lon=-3.9611&cz=NaN>

¹³ Passivhaus Institut, "Component Database: Window SL82 Passiv 1.0", Passive House, consultado el 19 de junio de 2022. <https://database.passivehouse.com/en/components/list/window?lat=40.6818&lon=-3.9611&cz=NaN>



Sección D-D

Figura 114. Sección del marco seleccionado. Medidas expresadas en milímetros. Fuente: Daniel Morales Gorostiza.

El marco fue evaluado y certificado para una ventana de 1,23×1,48 metros en posición vertical, utilizando un intercalario certificado Swisspacer Ultimate¹⁴ con polisulfuro como sellante secundario y un vidrio de 48 milímetros (triple vidrio 4/18/4/18/4) con una transmitancia térmica de 0,90W/m²K. Bajo estos parámetros se obtuvieron las siguientes prestaciones térmicas:

Sección de marco	Ancho del marco (mm)	Valor U del marco (W/m ² K)	Valor Ψ del separador (W/mK)	Factor de temperatura $f_{Rsi=0,25}$
Superior	124	1,02	0,026	0,70
Lateral	124	1,02	0,026	0,70
Inferior	124	1,02	0,026	0,70
Montante	176	0,97	0,025	0,67

Tabla 19. Comportamiento higrotérmico del marco de ventana certificado seleccionado. Medidas expresadas en milímetros. Fuente: Passivhaus Institut.

¹⁴ Passivhaus Institut, "Component Database: Glazing edge bond SWISSPACER ULTIMATE", Passive House, consultado el 20 de junio de 2022. https://database.passivehouse.com/en/components/details/glazing_edge_bond/swisspacer-swisspacer-ultimate-1497sp01?lat=40.6818&lon=-3.9611&cz=NaN

12.2. Criterio de eficiencia: reducción de puentes térmicos

Tal y como se hiciera en los encuentros de muros con carpinterías, es posible analizar el flujo de calor en los encuentros de muros con forjados a partir de los resultados gráficos obtenidos de la simulación con HTflux.

En el encuentro de fachada hastial con forjado (Figura 115), se observa nuevamente la influencia que tienen en la transmisión de calor los perfiles U de aluminio que conforman el marco rigidizador. A su vez, la subestructura del acabado interior también influye en la conformación del puente térmico que transmite el calor del interior al exterior.

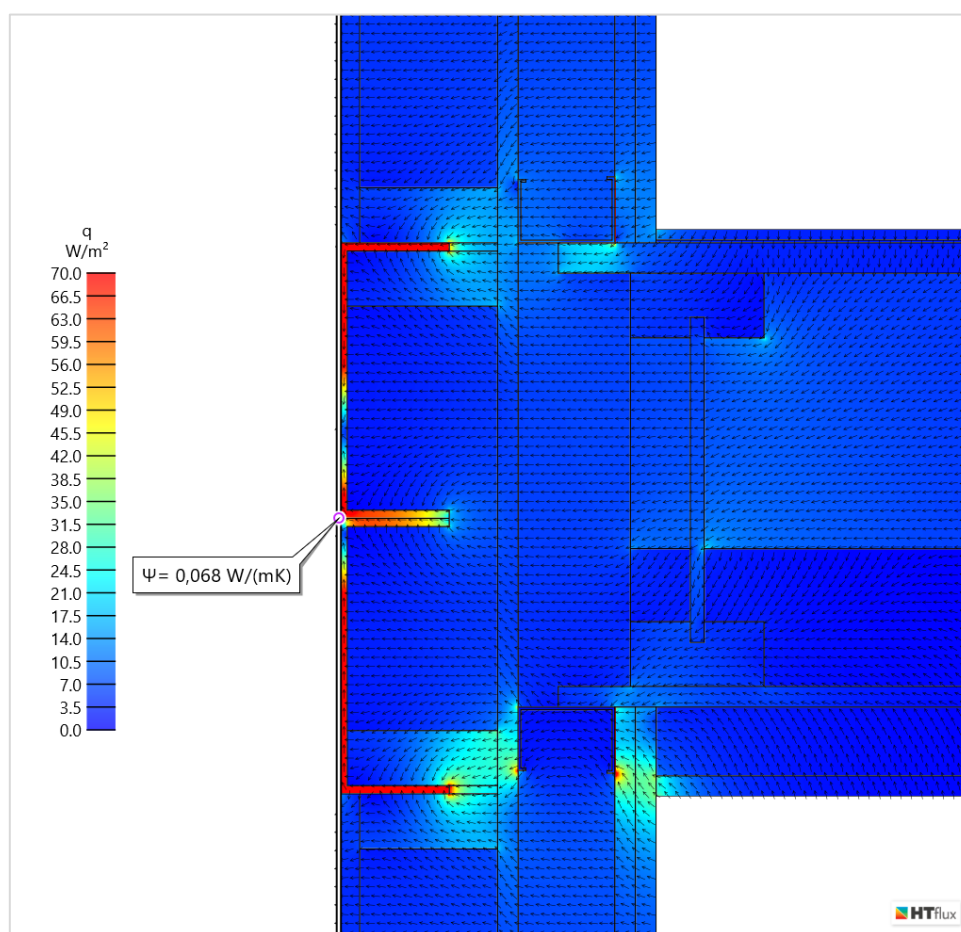


Figura 115. Flujo de calor en el encuentro EW1_EW1_CE1. Fuente: HTflux.

Retomando los conceptos vistos en el capítulo de fundamentos teóricos, el puente térmico ocurre por interrupción del aislamiento térmico, situación evidente en este detalle en particular. Para corregir el puente térmico, se debe evitar dicha interrupción, o bien colocar en ella materiales de baja conductividad térmica. En ese sentido, se podría reducir el puente térmico en este encuentro mediante las siguientes soluciones:

- Reducir la sección de los perfiles U de aluminio, en particular el largo de las alas que penetran en el aislamiento térmico.

- Aumentar el aislamiento térmico en la zona del forjado cercana al muro.
- Introducir materiales de baja conductividad térmica en las cavidades que se forman entre los perfiles de aluminio y los rastreles de madera.
- Reubicar la subestructura metálica del acabado interior para que el flujo de calor no tenga una conexión directa entre componentes metálicos de la cara caliente y la cara fría de la fachada.
- Reducir el contacto entre elementos sin capacidad aislante, como el que ocurre entre el acabado interior del muro y el acabado del falso techo.

En todos los casos, hablamos de soluciones que deben combinarse para alcanzar el límite permitido por el estándar, ya que este detalle posee un puente térmico particularmente alto (casi siete veces más grande que lo permitido). Por tal razón, una sola modificación no bastaría para alcanzar el límite de $0,010\text{W/mK}$.

En el encuentro de muro portante con forjado (Figura 116), solo existe un perfil U de aluminio, sobre el cual se apoyan las vigas I que conforman la estructura del forjado. Por tal razón, el puente térmico, aunque no esté dentro de los límites establecidos por el estándar Passivhaus, es sensiblemente menor al calculado en el encuentro de forjado con fachada hastial. Las soluciones que se implementen deben basarse en el aumento del aislamiento térmico en donde el forjado penetra en el muro, como así también en la reducción del contacto entre componentes sin capacidades aislantes.

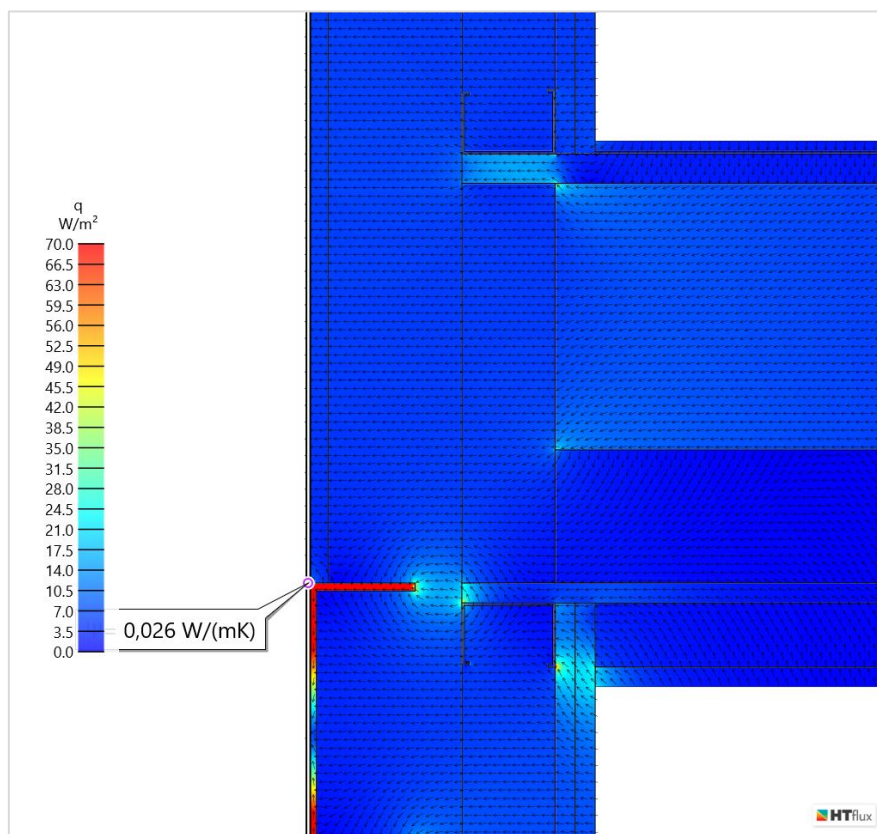


Figura 116. Flujo de calor en el encuentro EW2_EW2_CE1. Fuente: HTflux.

Finalmente, en el encuentro de cumbrera, el puente térmico se produce por la presencia de la viga laminada que funciona como refuerzo estructural. Resulta evidente entonces que el puente térmico puede reducirse o directamente anularse si se prescinde de dicho elemento. Su existencia está condicionada por la luz a cubrir por los dos faldones: en la construcción de viviendas con este sistema se ha verificado que en tanto la luz sea igual o menor a 5 metros, el sistema constructivo puede prescindir de dicho refuerzo. De esta manera, se puede cumplir la exigencia en el valor del puente térmico.

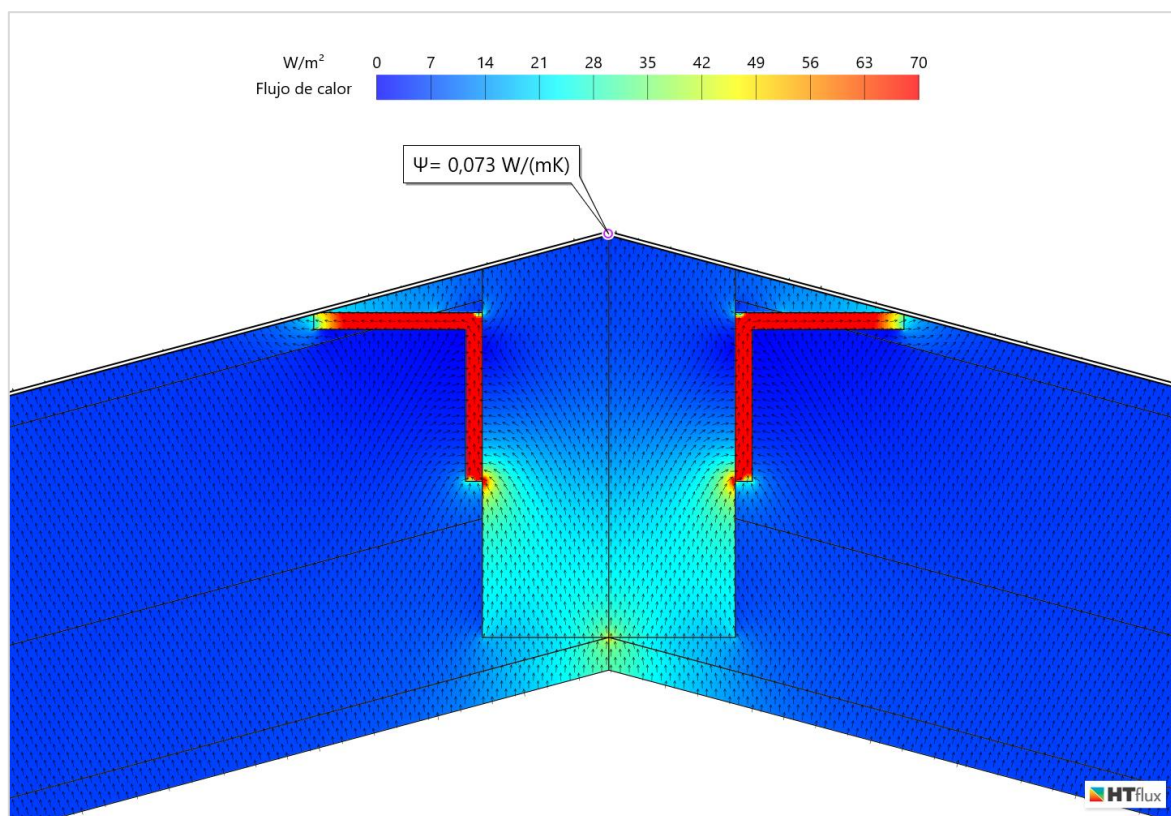


Figura 117. Flujo de calor en el encuentro R01_R01. Fuente: HTflux.

12.3. Criterio de higiene y criterio de eficiencia: factor de temperatura

Dada la ecuación que determina el valor de la temperatura superficial interior:

$$T_{si} = T_i - U/h \times (T_i - T_e)$$

Se observa que ante una temperatura interior T_i , una temperatura exterior T_e y un coeficiente de convección h que no presentan cambios, solo la variación de la transmitancia térmica U puede hacer variar la temperatura superficial interior. En ese sentido, en el caso de los encuentros de muros con carpinterías, al modificar el tipo de ventana por una de mejores prestaciones térmicas, el valor de la transmitancia térmica U también se modifica. Por lo tanto, es de esperar que las mejoras a realizar para cumplir el criterio de confort sean suficientes para cumplir también el criterio de higiene.

Por otro lado, en lo que se refiere al cumplimiento del criterio de eficiencia en encuentros estrictamente opacos, ya se estableció que dos de los encuentros con cubierta no alcanzaban el valor mínimo de f_{Rsi} requerido. Al observar las isotermas del diagrama de temperaturas de la cumbre, se aprecia que aquí también existe una influencia negativa de la viga laminada, como ocurriera en el estudio del puente térmico. Por lo tanto, corregir el puente térmico mediante la eliminación de dicho refuerzo, también alteraría el valor de la temperatura superficial interior en este encuentro.

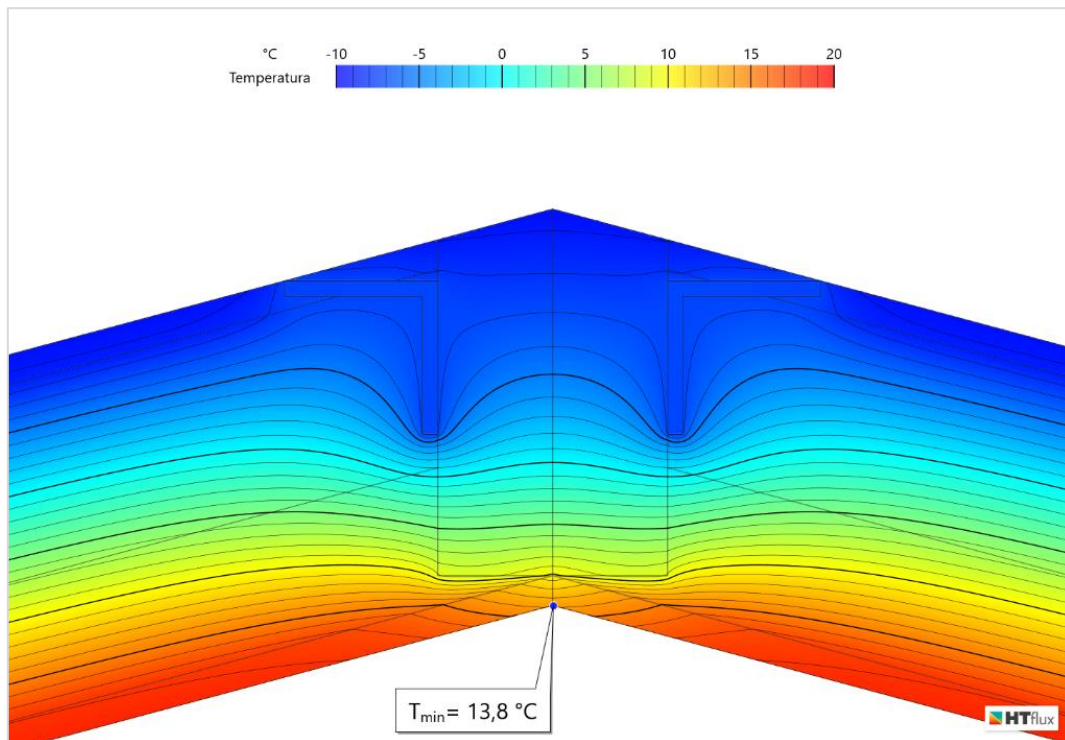


Figura 118. Temperatura superficial interior en el encuentro R01_R01. Fuente: HTflux.

En el caso del encuentro de fachada hastial con cubierta, las isotermas revelan una alteración de la temperatura en torno al plano donde se vincula el acabado interior de la cubierta con la subestructura del acabado interior del muro. Para corregir este inconveniente, se puede reducir o eliminar esa superficie de contacto, o bien desplazar la subestructura metálica para que la alteración de la temperatura ocurra lo más lejos posible de la superficie interior. En cualquier caso, se debe verificar que el cambio no empeore el valor del puente térmico, que en la solución original sí satisface el requerimiento del estándar.

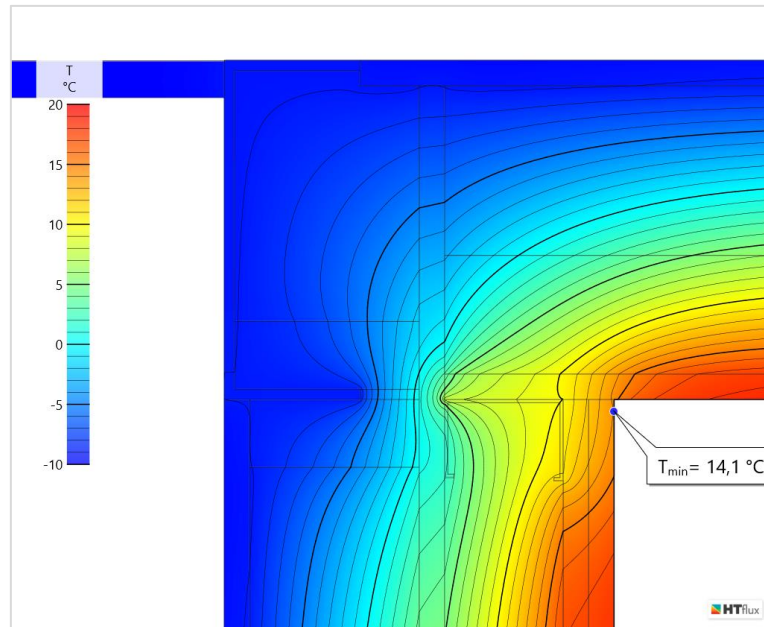


Figura 119. Temperatura superficial interior en el encuentro EW1_R01-ve1. Fuente: HTflux.

12.4. Criterio de humedad: eliminación de condensación intersticial

El único encuentro que presentó condensaciones intersticiales en cinco meses del año es el encuentro entre fachada hastial y forjado. Como se observa en la Figura 120, la condensación se concentra en la cara interior de los perfiles U de aluminio, dado que este material posee una resistencia al paso del vapor de agua ilimitada.

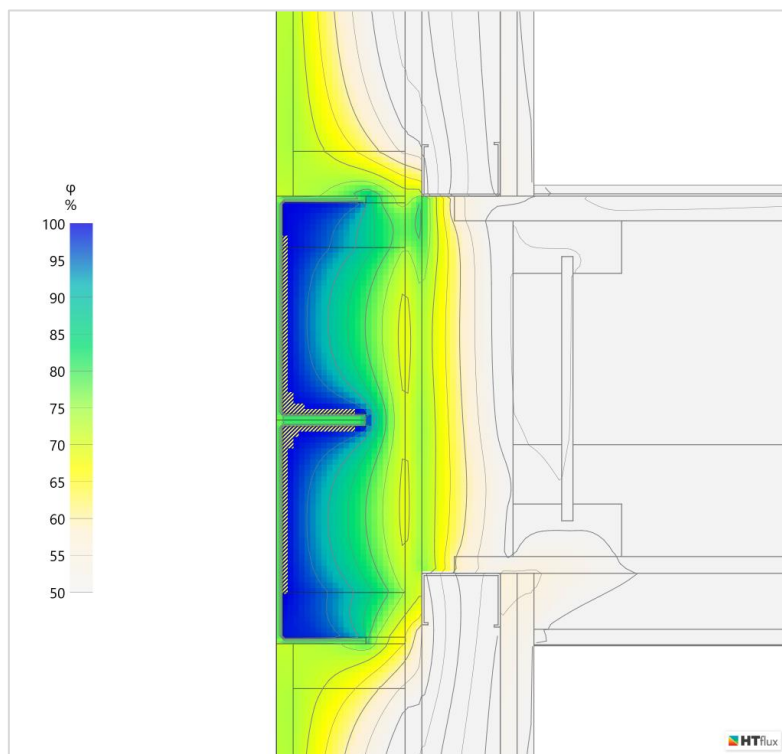


Figura 120. Condensación intersticial interior en el encuentro EW1_EW1_CE1. Fuente: HTflux.

Considerando que el muro en planta baja y el muro y pavimento de planta alta poseen una barrera de vapor, la difusión de vapor ocurre desde el ambiente interior en planta baja, a través del forjado hasta condensar en el muro. El gráfico de presión de vapor (Figura 121) muestra el progresivo aumento de la presión a través del forjado y el muro, fenómeno que no ocurre cuando existe una barrera de vapor.

En este caso, la solución a la producción de condensaciones intersticiales implica introducir una barrera de vapor en la cara caliente del aislamiento térmico del falso techo de la planta baja. La solución al problema de condensación debe ser compatible con las soluciones planteadas para reducir el puente térmico en este encuentro.

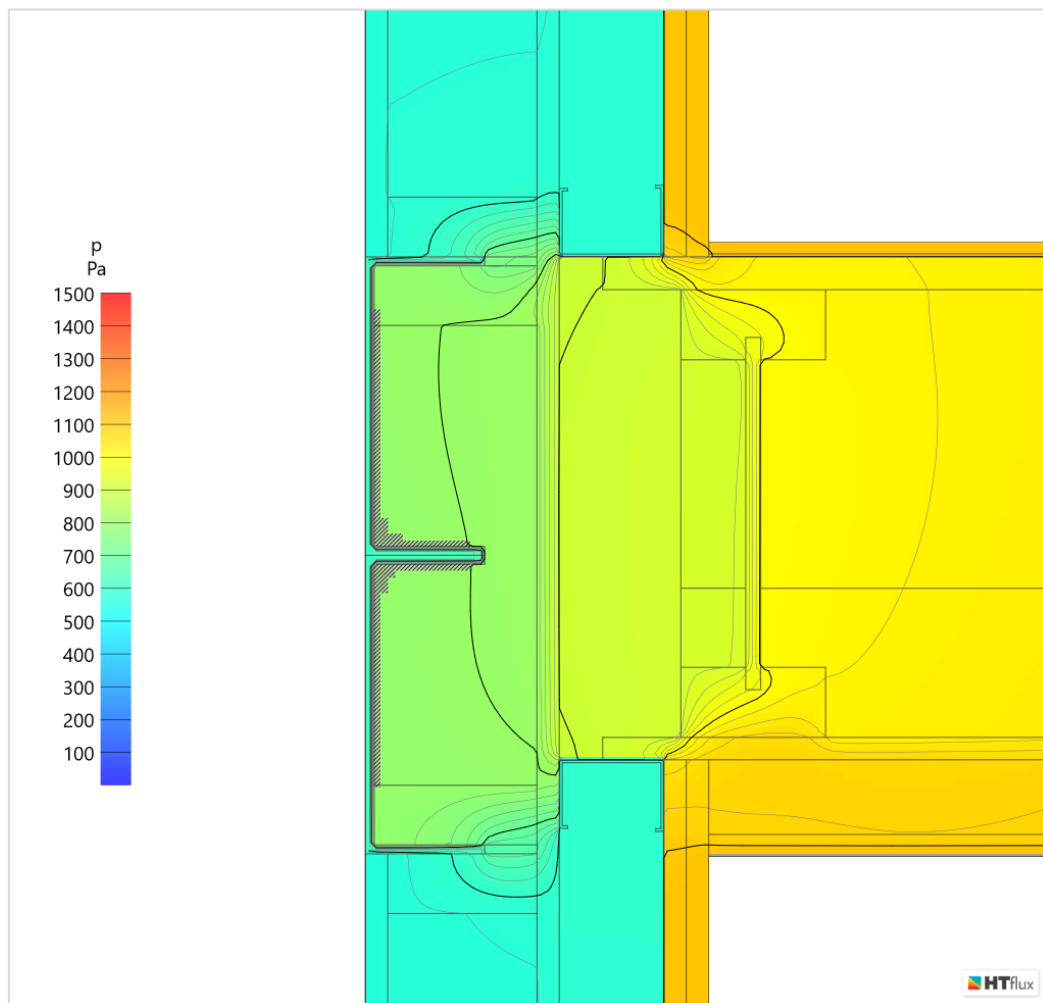


Figura 121. Presiones de vapor en el encuentro EW1_EW1_CE1. Fuente: HTflux.

13. Cálculo y simulación del sistema constructivo modificado

El procedimiento a seguir en términos de preparación de los archivos coincide con lo planteado en la simulación del sistema constructivo original. De igual manera, parámetros como las condiciones interiores y exteriores, las propiedades higrotérmicas de los materiales y el nivel de resolución de la simulación no se han modificado. A la base de datos de materiales se incorporan aquellos que conforman el marco de la ventana y que aún no habían sido utilizados en la simulación (PVC y poliuretano).

A diferencia de la simulación inicial, en este caso se crearon varias versiones de cada detalle hasta encontrar aquella que demuestre las mejores prestaciones higrotérmicas del sistema constructivo. Se trata, por lo tanto, de un **proceso iterativo** en donde se valora el impacto de cada modificación en el comportamiento higrotérmico del sistema constructivo hasta llegar a la mejor solución posible, teniendo en cuenta las limitaciones propias de la investigación.

Por lo expuesto, en algunos casos se han propuesto cambios que afectan otros aspectos del sistema constructivo, como el comportamiento estructural o el costo. Aun así, no es objetivo de este trabajo evaluar el impacto de las modificaciones en otros aspectos ajenos al higrotérmico.

13.1. Encuentros con forjados

EW1_EW1_CE1

Tras las modificaciones, es posible alcanzar un valor de transmitancia térmica lineal igual a 0,009W/mK. De igual manera, la incorporación de la barrera de vapor en el falso techo impide la condensación intersticial en la cara interior de los perfiles de aluminio en todos los meses del año. Se verifica también que la temperatura superficial interior permanece por encima de los 14,6°C. Con una temperatura superficial interior de 17,3°C, se obtiene un factor de temperatura de 0,91. De esta manera, se siguen cumpliendo los criterios de higiene y de eficiencia relacionados al factor f_{Rsi} . Los cambios introducidos en el encuentro fueron los siguientes:

- Modificación de la sección de los perfiles U de aluminio a 55×170 milímetros.
- Relleno de cavidades entre perfiles U y rastreles con espuma de poliuretano.
- Desplazamiento de la subestructura metálica del acabado interior 5 centímetros hacia abajo hasta coincidir con el plano del falso techo.
- Eliminación del aislamiento térmico horizontal dentro del forjado y reemplazo por un aislamiento térmico lateral que envuelve la viga I más cercana a la fachada.
- Colocación de barrera de vapor horizontal en falso techo y reubicación de barreras de vapor verticales entre las placas de yeso laminado.

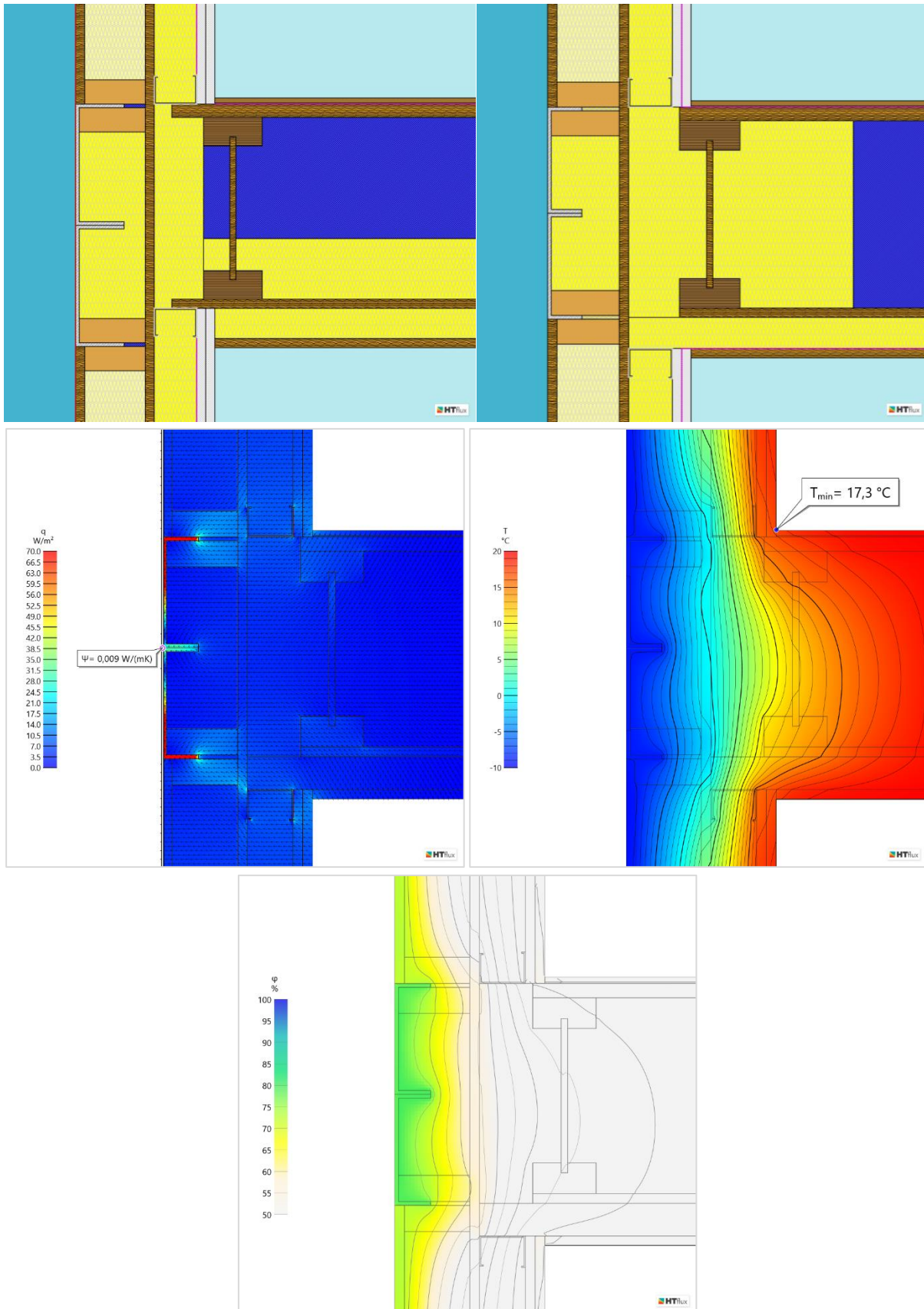


Figura 122. Arriba, comparación de detalle original y modificado. Abajo, nuevo comportamiento higrotérmico del encuentro EW1_EW1_CE1. Fuente: HTflux.

EW2_EW2_CE1

Tras las modificaciones, es posible alcanzar un valor de transmitancia térmica lineal igual a $0,008 \text{ W/mK}$. Se incorpora la barrera de vapor en el falso techo, aunque en este encuentro no fuera necesario, para coincidir con los cambios planteados en el otro encuentro con forjado. La temperatura superficial interior se mantiene por encima de los $14,6^\circ\text{C}$. Con un valor de $16,1^\circ\text{C}$, se alcanza un factor de temperatura f_{Rsi} igual a $0,87$.

Las modificaciones introducidas fueron:

- Extensión del espesor de la segunda capa de aislamiento térmico lateral del forjado, de 7 a 26 centímetros, y eliminación de la capa horizontal.
- Interrupción de los tableros OSB que conforman el forjado.

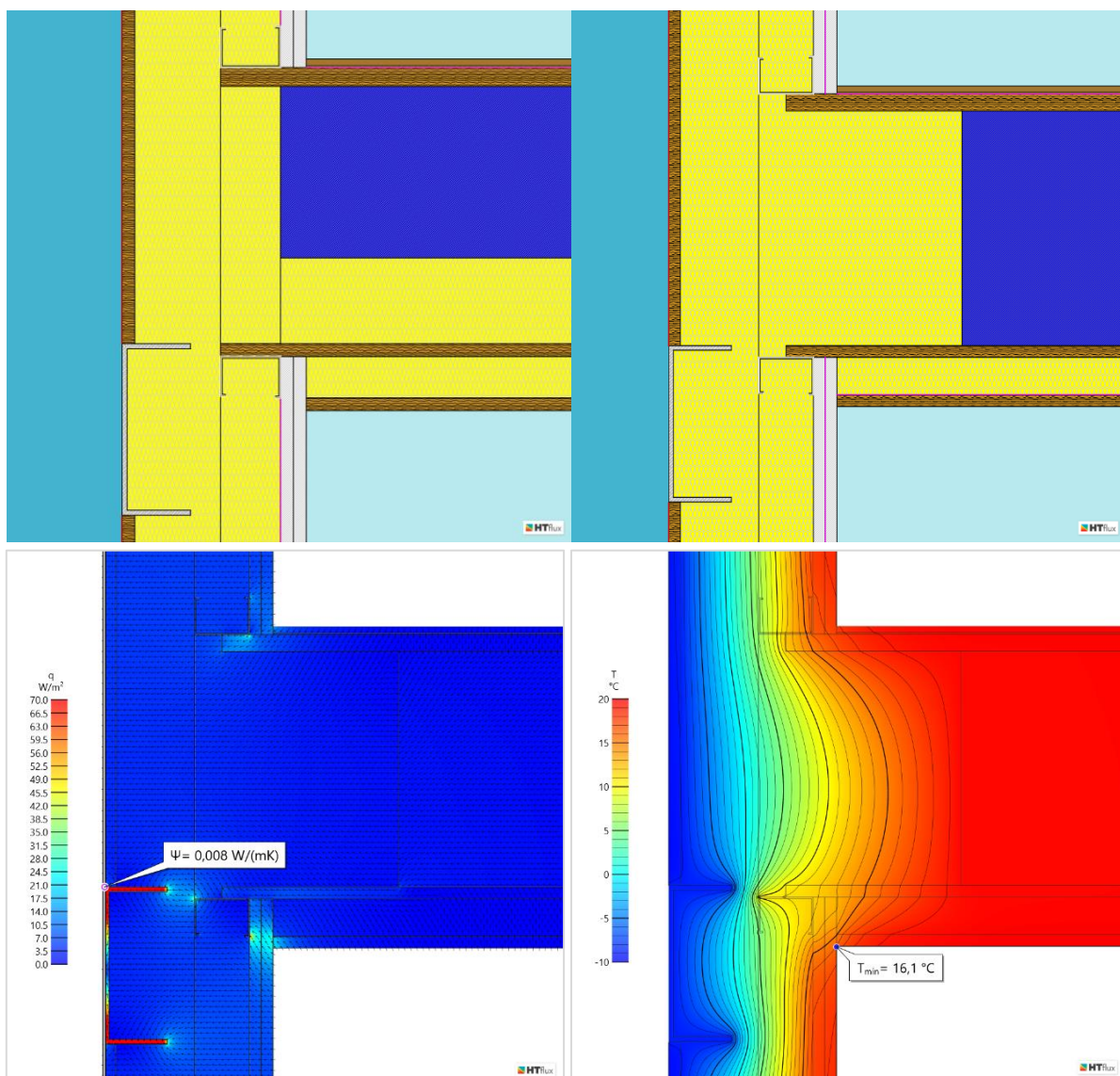


Figura 123. Arriba, comparación de detalle original y modificado. Abajo, nuevo comportamiento higrotérmico del encuentro EW2_EW2_CE1. Fuente: HTflux.

13.2. Encuentros con carpinterías

En términos generales, las modificaciones realizadas a los encuentros con carpinterías fueron las siguientes:

- Reemplazo de carpintería por otra de mejores prestaciones térmicas.
- Utilización de un premarco de madera sobre el que se apoya el marco de la carpintería.
- Aumento del espesor del material sellante que une el muro con la carpintería.
- Modificación de la sección de los perfiles U de aluminio a 55x170mm.
- Relleno de cavidades entre perfiles U y rastreles con espuma de poliuretano.

Para determinar el valor de la transmitancia térmica de la ventana instalada y verificar si se cumple con el valor límite indicado en el estándar, se parte de la ecuación de transmitancia térmica de ventana y de los datos conocidos provenientes del certificado Passivhaus del componente:

$$U_w = \frac{A_g \times U_g + A_f \times U_f + L_g \times \Psi_g + L_w \times \Psi_w}{A_w} \leq 1,05 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Factor	Valor calculado	Observaciones
A_w	1,8204 m ²	Sección de 1,23x1,48m según estándar
A_g	1,2098 m ²	Diferencia entre la superficie de ventana y la de marco
U_g	0,90 W/m ² K	Según certificado Passivhaus de la ventana
A_f	0,6106 m ²	Espesor de marco de 124mm, según certificado
U_f	1,02 W/m ² K	Según certificado Passivhaus de la ventana
L_g	4,428 m	Perímetro del vidrio
Ψ_g	0,026 W/mK	Según certificado Passivhaus de la ventana
L_w	5,42 M	Perímetro de la ventana
Ψ_w	-	Transmitancia térmica lineal obtenida en simulación

Tabla 20. Comportamiento higrotérmico y características de ventana adoptada. Fuente: Passivhaus Institut.

EW1_OB1

Tras las modificaciones se obtiene una transmitancia térmica lineal igual a $0,127 \text{ W/mK}$ y una temperatura superficial interior de $11,5^\circ\text{C}$. Con estos datos, se calcula una transmitancia térmica de ventana instalada U_w igual a $1,38 \text{ W/m}^2\text{K}$ y un factor de temperatura f_{Rsi} de $0,71$.

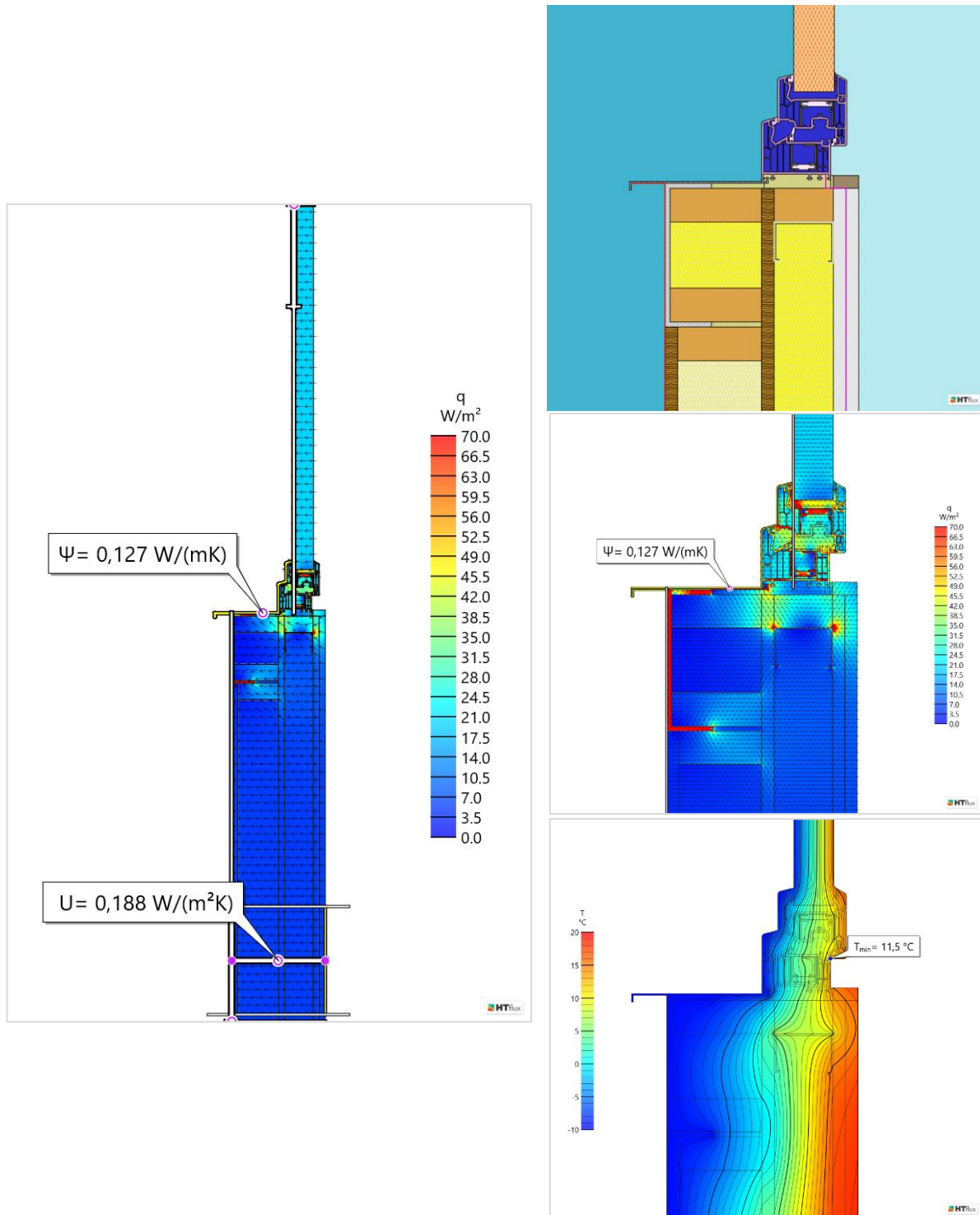


Figura 124. Nuevo comportamiento higtotérmico del encuentro EW1_OB1. Fuente: HTflux.

EW1_OH1

Tras las modificaciones se obtiene una transmitancia térmica lineal igual a $0,107 \text{ W/(mK)}$ y una temperatura superficial interior de $11,5^\circ\text{C}$. Con estos datos, se calcula una transmitancia térmica de ventana instalada U_w igual a $1,32 \text{ W/m}^2\text{K}$ y un factor de temperatura f_{Rsi} de $0,71$.

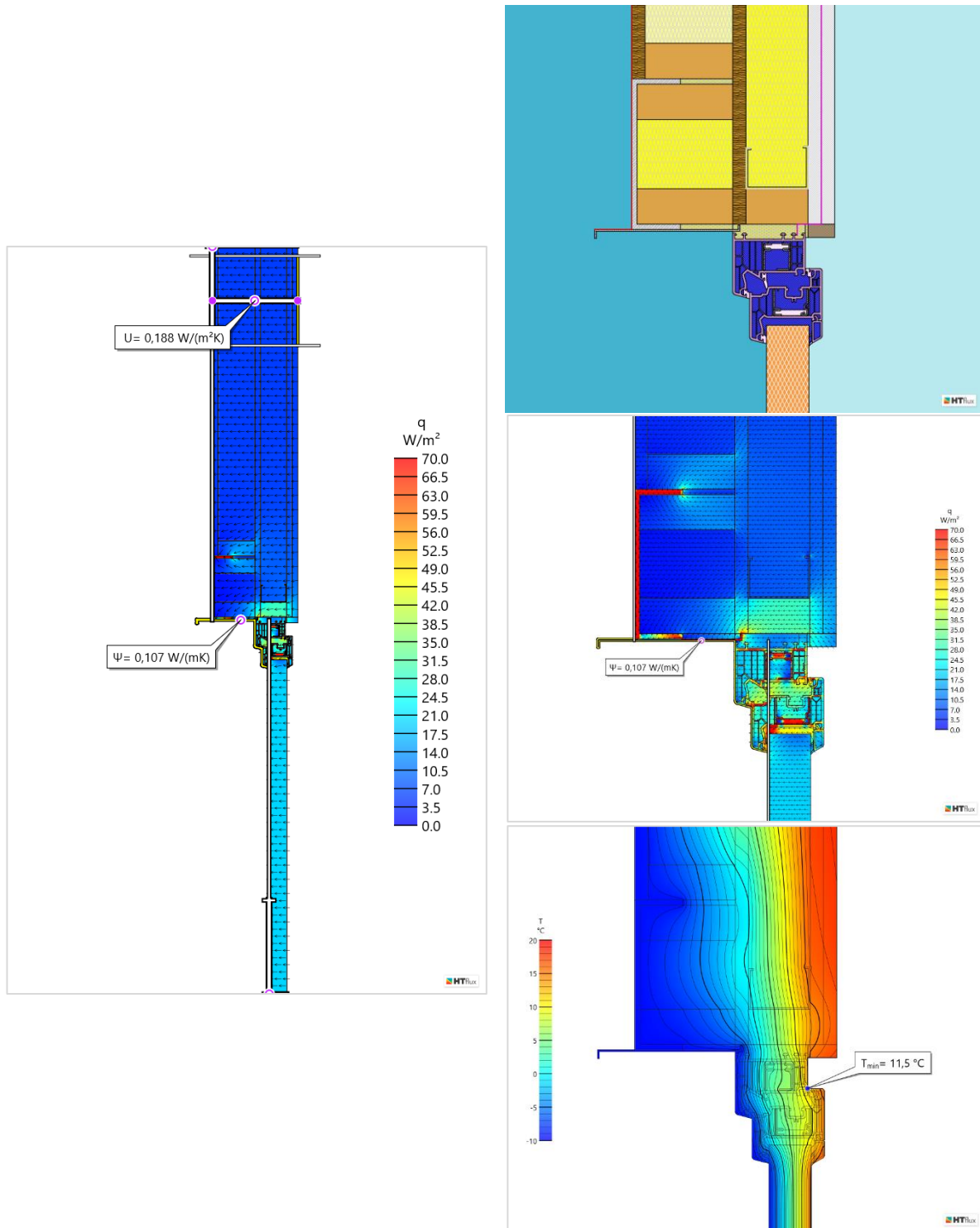


Figura 125. Nuevo comportamiento higrotérmico del encuentro EW1_OH1. Fuente: HTflux.

EW1_OJ1

Tras las modificaciones se obtiene una transmitancia térmica lineal igual a $0,098 \text{ W/mK}$ y una temperatura superficial interior de $11,6^\circ\text{C}$. Con estos datos, se calcula una transmitancia térmica de ventana instalada U_w igual a $1,29 \text{ W/m}^2\text{K}$ y un factor de temperatura f_{Rsi} de $0,72$.

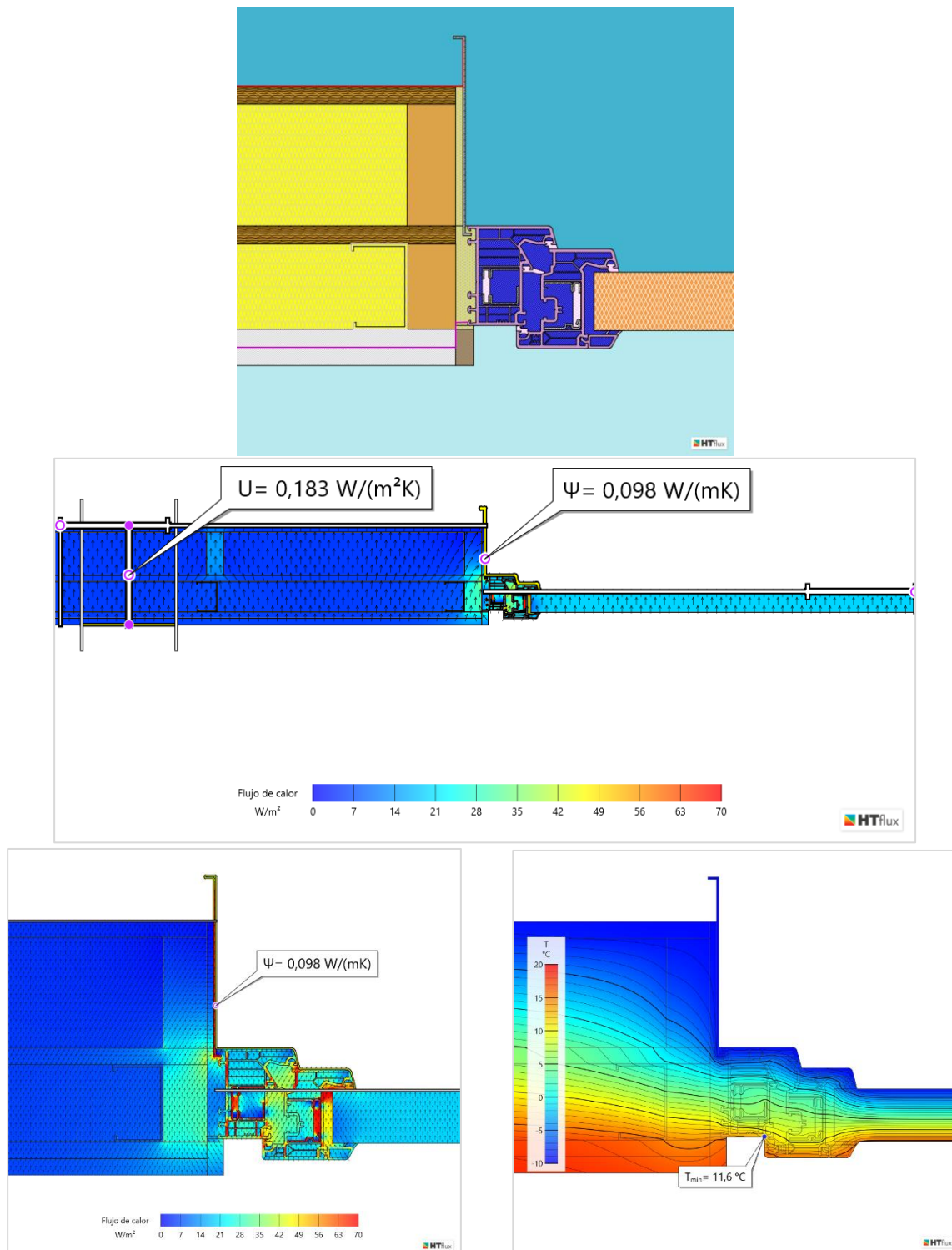


Figura 126. Nuevo comportamiento higrotérmico del encuentro EW1_OJ1. Fuente: HTflux.

EW2_OB1

Tras las modificaciones se obtiene una transmitancia térmica lineal igual a $0,090 \text{ W/mK}$ y una temperatura superficial interior de $11,6^\circ\text{C}$. Con estos datos, se calcula una transmitancia térmica de ventana instalada U_w igual a $1,27 \text{ W/m}^2\text{K}$ y un factor de temperatura f_{Rsi} de $0,72$.

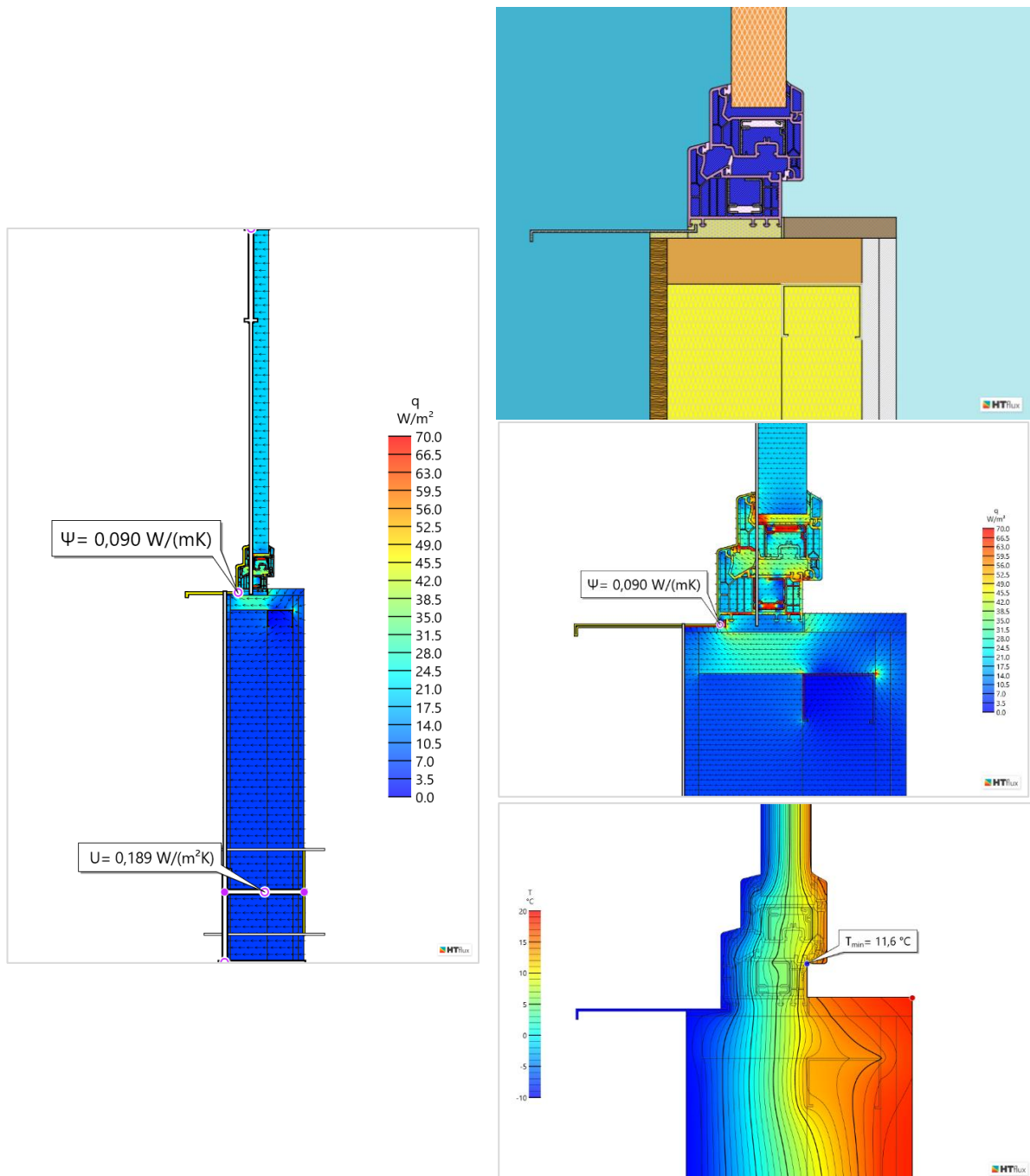


Figura 127. Nuevo comportamiento higrotérmico del encuentro EW2_OB1. Fuente: HTflux.

EW2_OH1

Tras las modificaciones se obtiene una transmitancia térmica lineal igual a $0,088 \text{ W/(mK)}$ y una temperatura superficial interior de $11,4^\circ\text{C}$. Con estos datos, se calcula una transmitancia térmica de ventana instalada U_w igual a $1,26 \text{ W/m}^2\text{K}$ y un factor de temperatura f_{Rsi} de $0,71$.

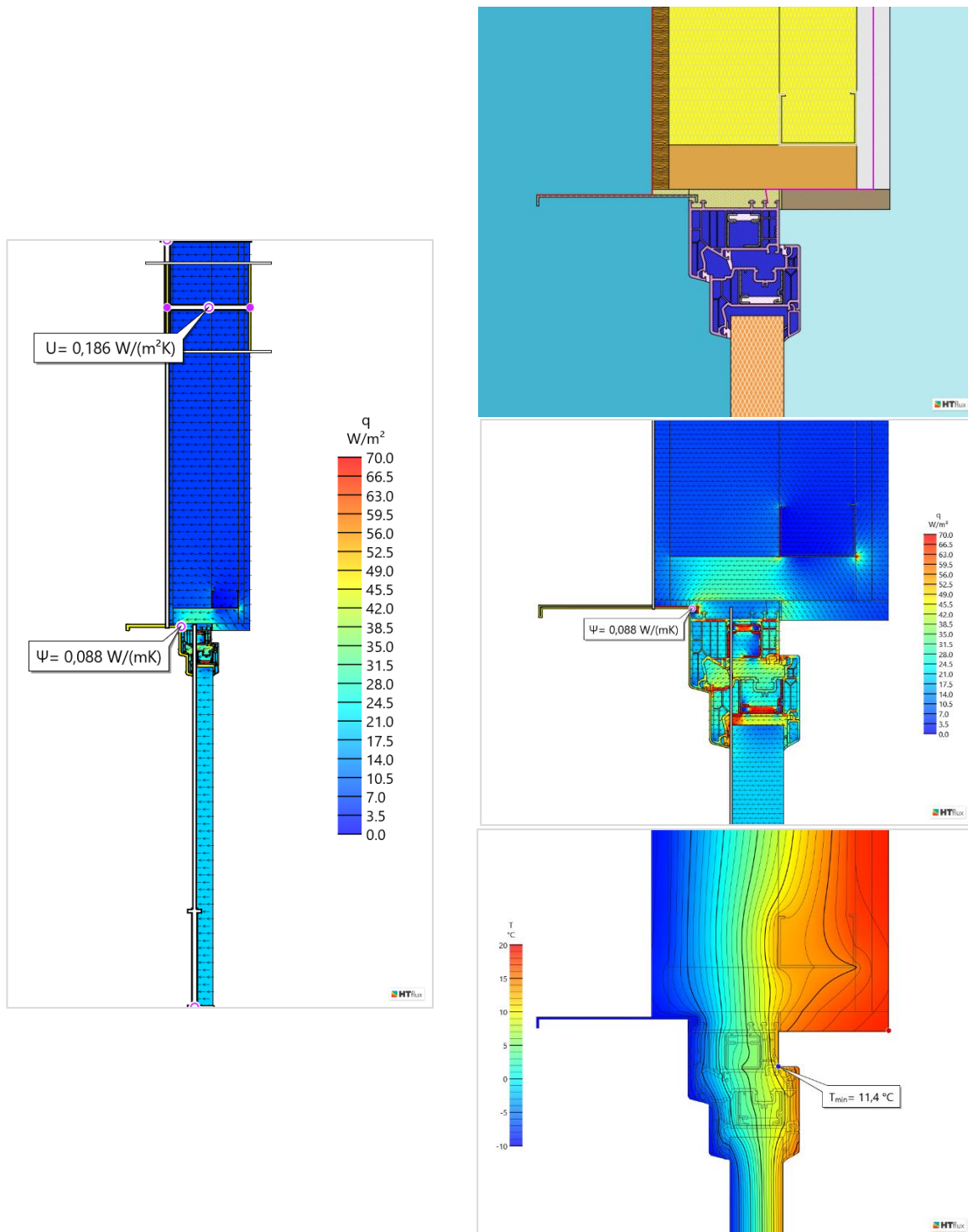


Figura 128. Nuevo comportamiento higrotérmico del encuentro EW2_OH1. Fuente: HTflux.

EW2_OJ1

Tras las modificaciones se obtiene una transmitancia térmica lineal igual a $0,082 \text{ W/(mK)}$ y una temperatura superficial interior de $11,3^\circ\text{C}$. Con estos datos, se calcula una transmitancia térmica de ventana instalada U_w igual a $1,24 \text{ W/m}^2\text{K}$ y un factor de temperatura f_{Rsi} de $0,71$.

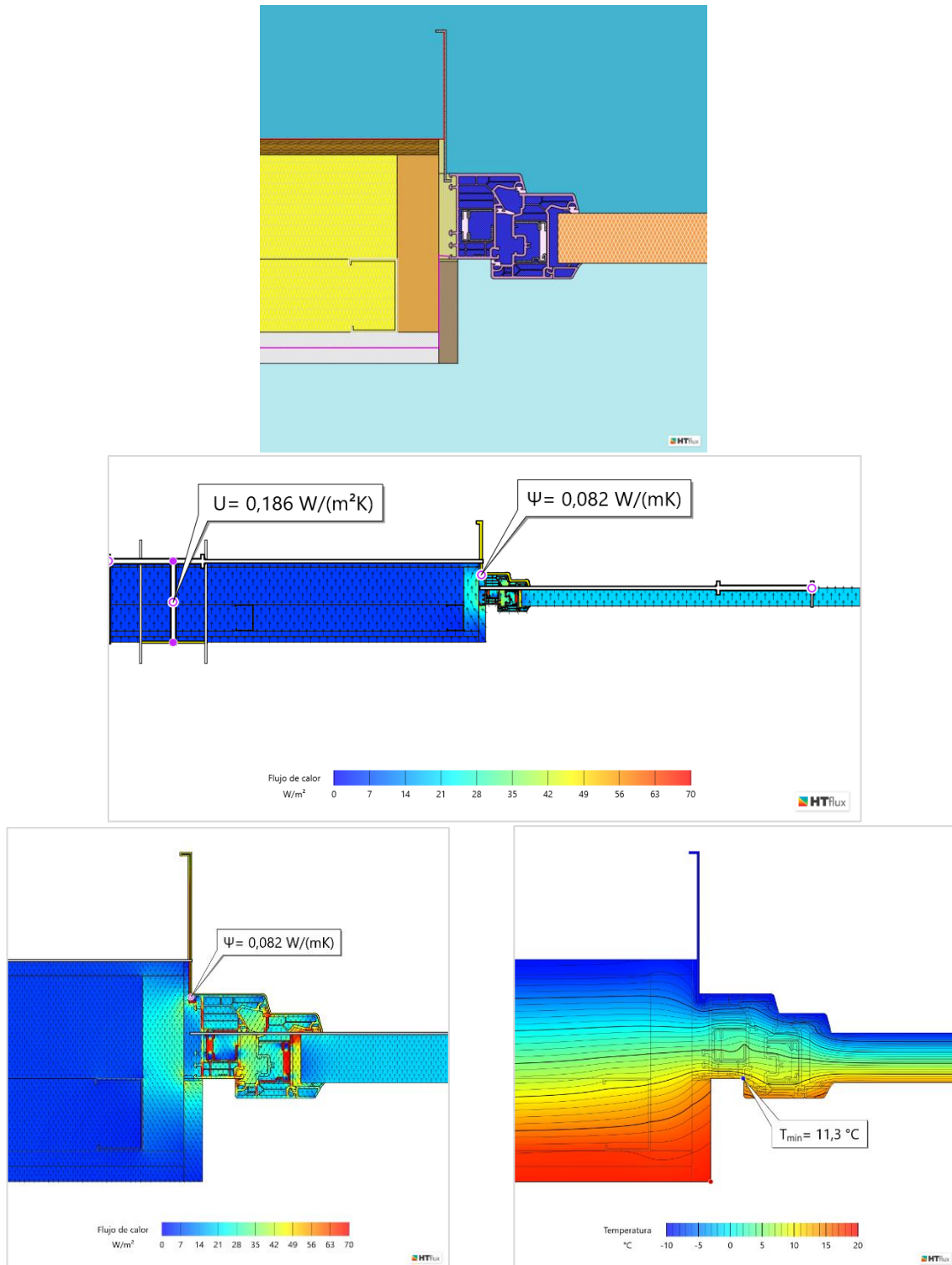


Figura 129. Nuevo comportamiento higratérmico del encuentro EW2_OJ1. Fuente: HTflux.

13.3. Encuentros con cubiertas

EW1_R01-ve1

Tras las modificaciones, se obtiene una temperatura superficial interior de 16,3°C. De esta manera, es posible alcanzar un factor de temperatura igual a 0,87, superior a los 0,82 exigidos por el estándar. El valor del puente térmico se mantiene dentro del límite establecido.

La modificación consistió en interrumpir el acabado interior de la cubierta para que disminuya la superficie de contacto con el perfil metálico.

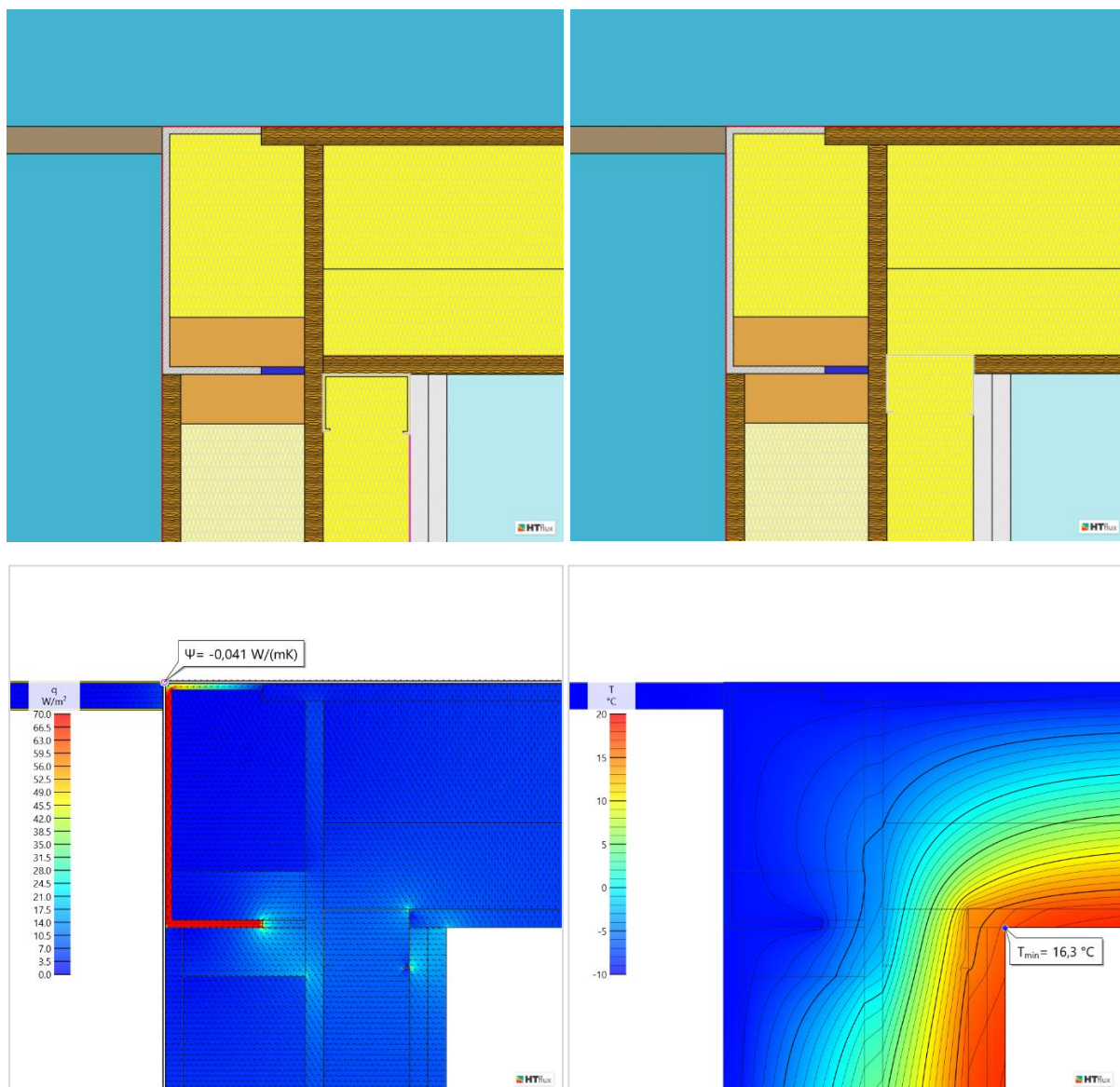


Figura 130. Arriba, comparación de detalle original y modificado. Abajo, nuevo comportamiento higrotérmico del encuentro EW1_R01-ve1. Fuente: HTflux.

RO1_RO1

Tras las modificaciones, se obtiene una temperatura superficial interior de 17,9°C. De esta manera, es posible alcanzar un factor de temperatura igual a 0,93, muy superior a los 0,82 exigidos por el estándar. El puente térmico desaparece y la transmitancia térmica lineal pasa a valer cero. El encuentro posee un comportamiento equiparable al del encuentro de muro portante con cubierta (EW2_RO1), donde la totalidad de la estructura es exterior y no hay interrupciones del aislamiento.

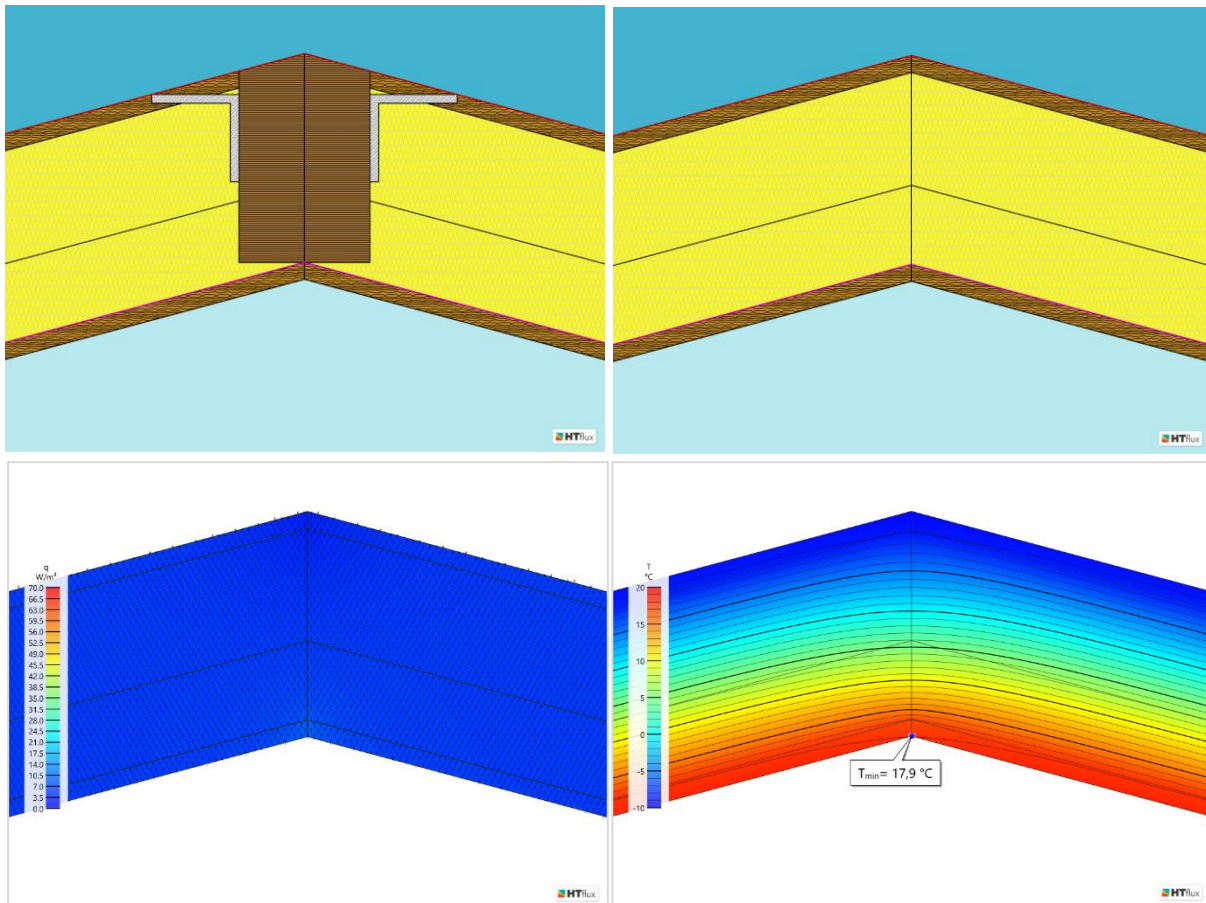


Figura 131. Arriba, comparación de detalle original y modificado. Abajo, nuevo comportamiento higrotérmico del encuentro RO1_RO1. Fuente: HTflux.

14. Comparación de resultados finales con el estándar Passivhaus

La Tabla 21 presenta los resultados obtenidos mediante la simulación de los once detalles que requerían modificaciones. En tanto la Tabla 22 presenta los resultados finales de los catorce detalles evaluables.

Encuentro	Criterio de higiene $f_{Rsi} \geq$ [-]	Criterio de confort U ventana instalada \leq [W/m ² K]	Criterios de eficiencia			Criterios de humedad		
			U del componente exterior [W/m ² K]	Detalles opacos $f_{Rsi} \geq$ [-]	Ausencia de puentes térmicos $\Psi_a \leq$ [W/mK]	Condensación [-]	Ma límite según DIN EN ISO 13788 \leq [g/m ²]	
			Estándar PH	0,65	1,05 (0,90)	0,25	0,82	0,010
1	EW1_EW1_CE1	0,91	-	0,187	0,91	0,009	✓	0
2	EW2_EW2_CE1	0,87	-	0,186	0,87	0,008	✓	0
3	EW1_OB1	0,71	1,38 (0,90)	0,188	-	0,127*	✓	0
4	EW1_OH1	0,71	1,32 (0,90)	0,188	-	0,107*	✓	0
5	EW1_OJ1	0,72	1,29 (0,90)	0,183	-	0,098*	✓	0
6	EW2_OB1	0,72	1,27 (0,90)	0,189	-	0,090*	✓	0
7	EW2_OH1	0,71	1,26 (0,90)	0,186	-	0,088*	✓	0
8	EW2_OJ1	0,71	1,24 (0,90)	0,186	-	0,082*	✓	0
9	EW1_RO1-ve1	0,87	-	0,188	0,87	-0,041	✓	0
10	RO1_RO1	0,93	-	0,188	0,93	0	✓	0

* En encuentros con carpintería, no se exige el cumplimiento de esta exigencia.

Tabla 21. Comportamiento higrotérmico de encuentros modificados. Fuente: HTflux.

Encuentro	Criterio de higiene $f_{Rsi} \geq$ [-]	Criterio de confort U ventana instalada \leq [W/m ² K]	Criterios de eficiencia			Criterios de humedad		
			U del componente exterior [W/m ² K]	Detalles opacos $f_{Rsi} \geq$ [-]	Ausencia de puentes térmicos $\Psi_a \leq$ [W/mK]	Condensación [-]	Ma límite según DIN EN ISO 13788 \leq [g/m ²]	
			Estándar PH	0,65	1,05 (0,90)	0,25	0,82	0,010
1	EW1_EW2-ec1	0,83	-	0,183	0,83	-0,017	✓	0
2	FS1_EW1	0,87	-	0,188	0,87	-0,043	✓	0
3	FS1_EW2	0,87	-	0,186	0,87	-0,045	✓	0
4	EW1_EW1_CE1	0,91	-	0,187	0,91	0,009	✓	0
5	EW2_EW2_CE1	0,87	-	0,186	0,87	0,008	✓	0
6	EW1_OB1	0,71	1,38 (0,90)	0,188	-	0,127*	✓	0
7	EW1_OH1	0,71	1,32 (0,90)	0,188	-	0,107*	✓	0
8	EW1_OJ1	0,72	1,29 (0,90)	0,183	-	0,098*	✓	0
9	EW2_OB1	0,72	1,27 (0,90)	0,189	-	0,090*	✓	0
10	EW2_OH1	0,71	1,26 (0,90)	0,186	-	0,088*	✓	0
11	EW2_OJ1	0,71	1,24 (0,90)	0,186	-	0,082*	✓	0
12	EW1_RO1-ve1	0,87	-	0,188	0,87	-0,041	✓	0
13	EW2_RO1	0,90	-	0,188	0,90	0	✓	0
14	RO1_RO1	0,93	-	0,188	0,93	0,073	✓	0

* En encuentros con carpintería, no se exige el cumplimiento de esta exigencia.

Tabla 21. Comportamiento higrotérmico del sistema modificado. Fuente: HTflux.

- **Criterio de higiene.** Todos los encuentros cumplen con este requisito del estándar. El cambio de ventana contribuye a aumentar el valor de la temperatura superficial interior, necesario para que la formación de moho y condensación puedan ser prevenidas de manera segura en condiciones normales de temperaturas exteriores, temperaturas interiores y niveles de humedad en el aire interior.

En encuentros con carpintería, se obtiene un valor de factor de temperatura f_{Rsi} igual a 0,71, y 0,72, valores muy cercanos al 0,70 indicado en el certificado Passivhaus de la ventana adoptada.

- **Criterio de confort.** Si bien las prestaciones térmicas de la ventana mejoran respecto a la ventana utilizada originalmente en el sistema constructivo, el valor máximo admitido de transmitancia térmica de ventana instalada no es alcanzado. La transmitancia térmica promedio entre los seis encuentros simulados es de 1,29W/m²K, un 23% superior al límite de 1,05W/m²K para certificar componentes en clima cálido templado.

La razón que explica que incluso adoptando una ventana certificada no se cumpla la exigencia, radica en el valor del puente térmico de la ventana instalada. Para cumplir con el estándar, la transmitancia térmica lineal Ψ no debería sobrepasar un máximo de 0,016W/m²K. Sin embargo, en las simulaciones se obtuvo un valor promedio de 0,098W/m²K, más de seis veces superior al admitido.

Respecto a las posibles formas de conectar el cerramiento opaco con la carpintería, el certificado Passivhaus del marco de ventana ha validado tres soluciones que dan como resultado una transmitancia térmica de ventana instalada inferior a 1,05W/m²K.¹⁵ Una de estas soluciones es aplicable en fachada ventilada (Figura 132). La forma de instalación validada se plantea para un muro con transmitancia térmica U de 0,25W/m²K y con aislamiento térmico por el exterior. Esta configuración da como resultado una transmitancia térmica de ventana de 1,01W/m²K. La solución se sustenta en el aumento considerable de la sección del material sellante que conforma el contacto entre ventana y muro. En dintel, el sellante incluso envuelve la carpintería por su lateral exterior y se extiende hasta entrar en contacto con la estructura que sujeta la fachada ventilada.

Si bien en este trabajo se propuso aumentar la sección de material sellante, las soluciones aplicadas no poseen las características descritas en la solución validada para fachada ventilada. En ese sentido, sería posible reformular las soluciones planteadas tomando como base la propuesta aceptada por el estándar Passivhaus.

¹⁵ Passivhaus Institut, "Component Database: Window SL82 Passiv 1.0".

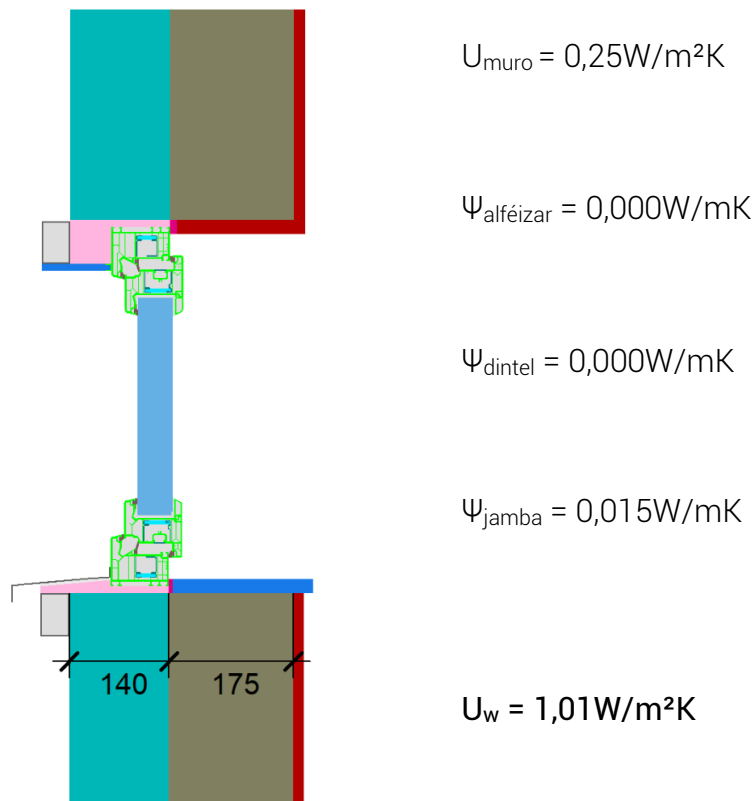


Figura 132. Solución para fachada ventilada validada en el certificado Passivhaus del marco de ventana. Fuente: Passivhaus Institut.

- **Criterios de eficiencia.** En relación a la transmitancia térmica límite de cerramientos opacos, no hubo necesidad de realizar modificaciones al sistema constructivo original. Todos los cerramientos opacos cumplen con los valores máximos de transmitancia térmica U en todos los encuentros. Se obtuvo un valor de $0,18\text{W/m}^2\text{K}$, inferior al límite de $0,25\text{W/m}^2\text{K}$.

Asimismo, tras las modificaciones, todos los encuentros estrictamente opacos satisfacen el valor mínimo de factor de temperatura requerido en este tipo de detalle. El encuentro de fachada hastial con cubierta y la cumbrera, que no cumplían con esta exigencia originalmente, a partir de los cambios pasan a tener un valor de f_{Rsi} de $0,87$ y $0,93$, respectivamente.

Además, gracias a las modificaciones, todos encuentros opacos evaluados poseen un valor de transmitancia térmica lineal Ψ por debajo del límite establecido. En el encuentro de fachada hastial con forjado y de muro portante con forjado, una sucesión de modificaciones permite alcanzar valores de puente térmico de $0,009$ y $0,008\text{W/mK}$, respectivamente. Por su parte, la eliminación del refuerzo estructural en cumbrera permite que este encuentro no tenga puente térmico alguno. Sin embargo, esta condición solo puede satisfacerse en tanto la luz a cubrir con los faldones no supere los 5 metros. Caso contrario, el refuerzo será necesario y el puente térmico volverá a aparecer.

- **Criterios de humedad.** La inclusión de una barrera de vapor en el falso techo de la planta baja elimina el problema de condensación en el encuentro de fachada hastial con forjado. Este cambio se materializa también en el otro encuentro con forjado, aunque en este no se presentaron problemas de condensación durante las simulaciones.

Los resultados conseguidos pueden resumirse de la siguiente manera:

- **Todos los encuentros cumplen con el criterio de higiene.**
- **La carpintería instalada mejora sus prestaciones térmicas, pero no logra cumplir con el criterio de confort.**
- **Todos los encuentros cumplen con las tres exigencias del criterio de eficiencia.**
- **Todos los encuentros cumplen con las dos exigencias del criterio de humedad.**

Parte IV

Conclusiones

- 15. Cumplimiento de objetivos
- 16. Certificación del sistema constructivo
- 17. Implementación de las modificaciones
- 18. Futuras líneas de investigación y limitaciones encontradas
- 19. Reflexiones finales



15. Cumplimiento de los objetivos

A lo largo de este trabajo, se llevaron a cabo una serie de acciones concatenadas para cumplir con el objetivo general y los objetivos específicos planteados.

En una primera etapa, se reconocieron los fundamentos teóricos básicos que sustentan las exigencias del estándar Passivhaus. Se estudiaron los fenómenos de la transmisión de calor, la difusión de vapor y los puentes térmicos, ya que representan los fenómenos físicos de mayor relevancia en la caracterización del comportamiento higrotérmico de un sistema constructivo.

Seguidamente, se llevó a cabo una comprensión cualitativa y cuantitativa de los requerimientos del estándar. Se recurrió al documento oficial creado por el Passivhaus Institut, titulado "Criteria and Algorithms for Certified Passive House Components: Opaque construction systems". En él, se detectó que existen siete exigencias agrupadas en cuatro criterios distintos, más rigurosas cuanto más fría es la zona climática considerada.

- **Criterio de higiene.** Evalúa el factor de temperatura f_{Rsi} presente en distintos tipos de detalles constructivos. Se establece que el factor de temperatura límite en la zona climática cálida templada es de 0,65.
- **Criterio de confort.** Evalúa la transmitancia térmica de la ventana instalada. Se establece una transmitancia térmica máxima de ventana instalada igual a $1,05W/m^2K$, y una transmitancia térmica máxima de vidrio de $0,90W/m^2K$ para la zona climática cálida templada.
- **Criterios de eficiencia.** Evalúan la transmitancia térmica de los componentes opacos, el factor de temperatura de los detalles constructivos estrictamente opacos y la transmitancia térmica lineal de esos detalles. Se establece en la zona climática cálida templada que la transmitancia térmica de componente exterior debe ser como máximo igual a $0,25W/m^2K$, el factor de temperatura debe ser como mínimo de 0,82 y la transmitancia térmica lineal debe ser como máximo de $0,010W/mK$.
- **Criterios de humedad.** Evalúan la posibilidad de que la condensación intersticial que se genera en el componente pueda o no ser evaporada al cabo de un año, como así también la cantidad de condensación acumulada. Se establece un valor máximo de contenido de humedad acumulado de $200g/m^2$.

Reconocidos los criterios, se cumplió el **primer objetivo específico** planteado en este trabajo.

En una segunda etapa, se llevó a cabo un estudio del sistema constructivo modular de aluminio extrusionado, en el que se reconocieron los distintos componentes que lo conforman, su materialidad y la forma en que se resuelven los encuentros entre

componentes. Se recurrió a varias fuentes de información, entre ellas, la memoria de calidades del sistema, los planos de detalles constructivos y los datos provistos por los profesionales de la empresa que desarrolló el sistema y hoy en día construyen viviendas.

Tras conocer sus características constructivas, se procedió a estudiar su comportamiento higrotérmico siguiendo los procedimientos que figuran en las normas ISO 10211 e ISO 13788, normativa indicada por el estándar Passivhaus para la realización de los cálculos. Fue preciso utilizar un software de simulación de flujo de calor bidimensional. Se adoptó la versión 1.10 del programa de origen austríaco HTflux, validado de acuerdo con dicha normativa. Luego de configurar las condiciones de simulación para compatibilizarlas con los requerimientos del estándar, se realizó la simulación de catorce detalles constructivos. Estos catorce detalles son representativos de las soluciones adoptadas en el sistema constructivo y son, a su vez, requeridos por el estándar para la evaluación del sistema:

- Un encuentro de muro en esquina.
- Dos encuentros de muro con solera.
- Dos encuentros de muro con forjado.
- Seis encuentros de muro con carpintería.
- Dos encuentros de muro con cubierta.
- Un encuentro de cubierta en cumbrera.

Mediante la simulación, se detectó que el sistema constructivo posee una envolvente con una transmitancia térmica promedio de $0,18\text{W/m}^2\text{K}$, un factor de temperatura promedio en detalles estrictamente opacos de 0,84 y de 0,53 en encuentros con carpinterías. Asimismo, el puente térmico de los encuentros opacos posee un rango que va desde los $0,073\text{W/mK}$ en cumbrera, hasta los $-0,045\text{W/mK}$ en el encuentro de muro portante con solera. Por último, se detectó que solo en el encuentro de fachada hastial con forjado se produce condensación intersticial, más concretamente entre los meses de noviembre a marzo.

Reconocido el comportamiento higrotérmico del sistema constructivo, se cumplió el **segundo objetivo específico** planteado en este trabajo.

En una tercera etapa, se compararon los requerimientos del estándar con los resultados arrojados por la simulación, para determinar si el sistema, tal y como se aplica hoy en día, cumple con los criterios del estándar para clima cálido templado. De esta etapa se desprenden los siguientes resultados:

- **Criterio de higiene.** Se cumple en ocho de los catorce encuentros. No se cumple en los seis encuentros con carpintería, donde el factor de temperatura se encuentra por debajo de 0,65.

- **Criterio de confort.** No fue necesario calcular el valor de la transmitancia térmica de la ventana instalada mediante la fórmula correspondiente, ya que la ventana y el vidrio adoptados poseen una transmitancia térmica por encima de los límites establecidos por el estándar.
- **Criterios de eficiencia.** Los catorce encuentros simulados poseen una transmitancia térmica del componente exterior inferior a $0,25\text{W}/\text{m}^2\text{K}$. Seis de los ocho encuentros estrictamente opacos poseen un factor de temperatura superior a 0,82, siendo el encuentro de fachada hastial con cubierta y el encuentro de cumbrera los dos que poseen un factor de temperatura inferior al requerido. En cinco de los ocho encuentros opacos se obtuvieron valores de transmitancia térmica lineal inferiores a $0,010\text{W}/\text{mK}$. Los dos encuentros de muro con forjado y la cumbrera no satisfacen este requisito.
- **Criterios de humedad.** Solo un detalle incumple el primer criterio, ya que la condensación no se evapora al cabo de doce meses.

Establecida la comparación, se cumplió el **tercer objetivo específico** planteado en este trabajo.

En una cuarta etapa, conocidos los encuentros del sistema que no satisfacen las exigencias del estándar, se procedió a analizar los resultados numéricos y gráficos obtenidos mediante la simulación, con vistas a proponer soluciones constructivas que mejoren el desempeño energético del sistema y le permitan cumplir con los requisitos del estándar.

Entonces, como primera medida, se propuso mejorar el comportamiento higrotérmico de las carpinterías mediante la adopción de una ventana certificada como componente constructivo Passivhaus. Luego, se analizó el flujo de calor en aquellos detalles que no cumplieran con los valores exigidos por el criterio de eficiencia, relacionados a la transmitancia térmica lineal. Tras detectar cómo se efectúa la transmisión de calor en esos casos, se propusieron medidas correctoras para aminorar las pérdidas de calor por la envolvente. Finalmente, se estudió la difusión de vapor en el único detalle que presentó problemas de condensación y se propuso la utilización de una barrera de vapor en forjado para resolver esos inconvenientes.

Con las modificaciones establecidas, se procedió a editar los detalles constructivos originales y someterlos a un nuevo proceso de simulación, bajo las mismas condiciones de simulación que los detalles originales.

El encuentro de fachada hastial con forjado pasa de una transmitancia térmica lineal de $0,068\text{W}/\text{mK}$ a una de $0,009\text{W}/\text{mK}$. De igual manera, el encuentro de muro portante con forjado pasa de un puente térmico de $0,026\text{W}/\text{mK}$ a uno de $0,008\text{W}/\text{mK}$. Por otro lado, la transmitancia térmica promedio de los encuentros con carpinterías es de

1,29W/m²K y el factor de temperatura promedio de 0,71. Ya no se observa producción de condensación en ningún detalle.

Reconocido el comportamiento higrotérmico del sistema constructivo modificado, se cumplió el **cuarto objetivo específico** planteado en este trabajo.

En una quinta etapa, se tomaron los resultados obtenidos en la cuarta etapa y se los comparó con los criterios del estándar Passivhaus, tal y como se hiciera tras el análisis del sistema constructivo original. En este caso, solo se compararon los diez encuentros que fueron modificados.

- **Criterio de higiene.** Se satisface en los diez encuentros modificados. Todos poseen un factor de temperatura mayor a 0,65.
- **Criterio de confort.** No se satisface, ya que las transmitancias térmicas calculadas en los seis encuentros con carpintería superan el valor límite de 1,05W/m²K.
- **Criterios de eficiencia.** Tanto el valor de la transmitancia térmica U, como el factor de temperatura f_{Rsi} y la transmitancia térmica Ψ se cumplen en todos los encuentros.
- **Criterios de humedad.** Se cumple en todos los casos.

De esta manera, se cumplió el **quinto objetivo específico** planteado en este trabajo.

Por lo expuesto, se puede afirmar que el objetivo general del presente trabajo ha sido alcanzado, ya que fue posible evaluar el comportamiento higrotérmico del sistema constructivo modular de aluminio extrusionado de acuerdo a los requerimientos del estándar Passivhaus para componentes, indicados para clima cálido templado.

En relación al sexto y último objetivo planteado, este es abordado en el capítulo siguiente.

16. Certificación del sistema constructivo

En el documento "Criteria and Algorithms for Certified Passive House Components: Opaque construction systems", el Passivhaus Institut establece que un certificado se emite tras evaluar el sistema constructivo y verificar que se cumplen los criterios enlistados en dicho documento.¹ Asimismo, también se aclara qué detalles están exentos del cumplimiento de ciertos criterios, y en qué casos se puede requerir de estudios adicionales a los indicados en las normas ISO de referencia. Quiere decir que el proceso de certificación en sí mismo lo lleva a cabo el propio Passivhaus Institut, o aquellos profesionales avalados por él para certificar componentes. Solo en casos excepcionales, previa consulta con el Instituto, se acepta que los cálculos sean hechos por el propio fabricante del sistema.

El proceso de certificación se esquematiza en la Figura 133.

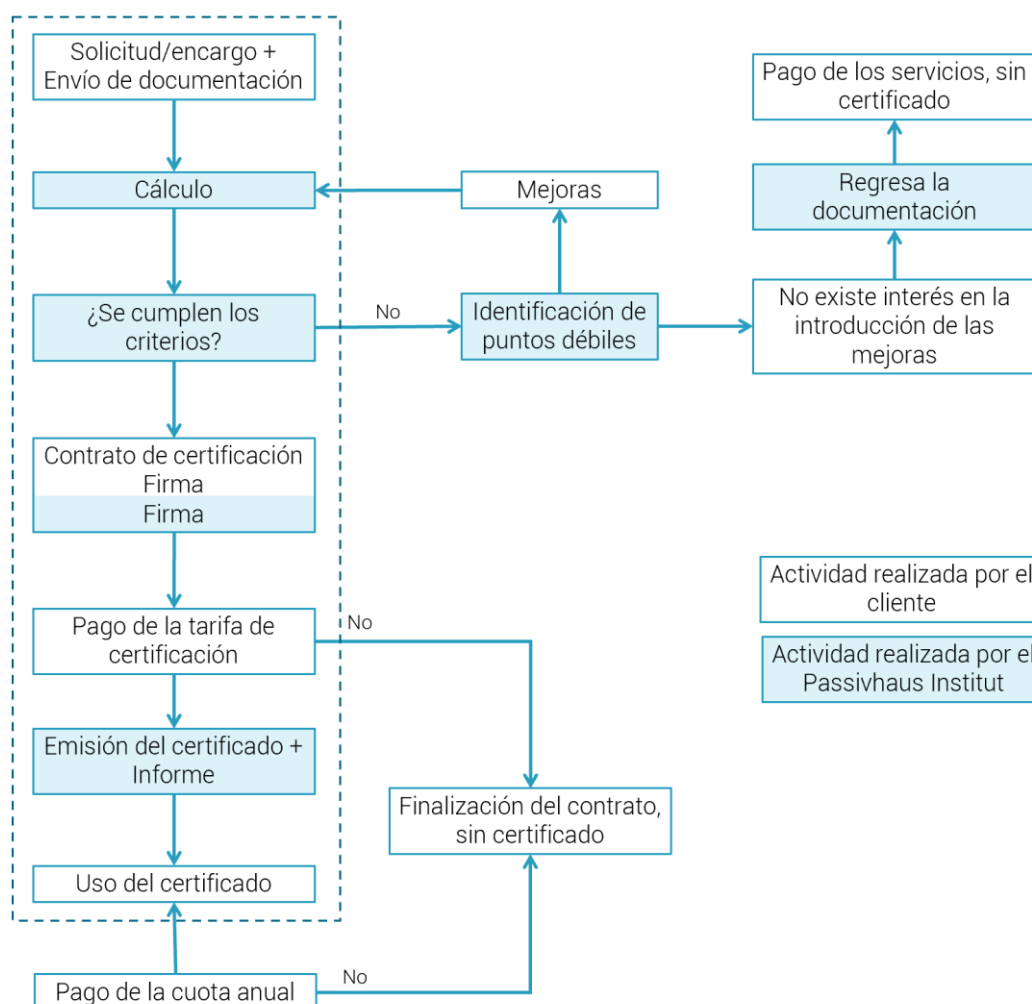


Figura 133. Proceso de certificación. Fuente: Passivhaus Institut.

¹ Passivhaus Institut, "Criteria and Algorithms for Certified Passive House Components: Opaque construction systems", Versión 3.1 del 7 de febrero de 2022, 2, https://passiv.de/downloads/03_certification_criteria_construction_systems_en.pdf

Por lo tanto, si bien los estudios llevados a cabo en este trabajo no pueden constituirse en sí como prueba de idoneidad Passivhaus, sí contribuyen a simplificar el proceso de certificación. Si el fabricante presenta la documentación habiendo reconocido previamente cómo es el comportamiento higrotérmico de su sistema constructivo, podrá evitar alargar el proceso, porque las mejoras ya se establecieron de antemano. En ese sentido, podemos afirmar que se cumple el **último objetivo específico** planteado, que es contribuir con el proceso de certificación del sistema constructivo.

Ahora bien, en la discusión de los resultados se observó que el criterio de confort, a pesar de haber propuesto mejoras en la carpintería, aún no pudo ser cumplido. Significa que el sistema constructivo aún no está en condiciones de ser certificado, ya que se requiere previamente mejorar los resultados obtenidos en los encuentros con carpinterías, específicamente en lo que se refiere al puente térmico. Solo luego de esa instancia, y con la certeza de que el sistema ha alcanzado el nivel requerido por el estándar, se podría presentar la documentación ante el Instituto Passivhaus y obtener el certificado tras atravesar el proceso correspondiente.

En relación a la documentación a presentar, el documento de criterios indica que se requiere, entre otros datos, lo siguiente:²

- Detalles de las conexiones requeridas, en formatos de archivo DXF o DWG y en formato PDF o en imágenes para publicación en formato PDF, BMP, JPG o PNG. Los materiales con diferentes conductividades térmicas deberán ser identificados.
- Los detalles de todas las composiciones del sistema constructivo en el edificio deberán mostrar al menos 3 encuentros donde se muestren interrupciones recurrentes o elementos de construcción estándar y las situaciones de conexión requeridas formadas por al menos dos metros del componente del edificio respectivo y con la representación de las subconstrucciones y/o de las interrupciones asignadas.
- Tablas con la información relacionada a los valores certificados de las conductividades térmicas, espesor de las capas y descripciones de los materiales para todas las composiciones del sistema constructivo. Todos los materiales, incluidos aquellos fuera de las composiciones estándar, deberán ser enlistados y especificados en detalle.

Como se aprecia, el listado es coincidente con muchos de los recursos utilizados y producidos en el contexto de este trabajo, que el fabricante podrá utilizar *a posteriori* para iniciar el proceso de certificación. Por lo tanto, la elaboración de este trabajo también ha contribuido en la preparación y creación de la documentación necesaria para emprender el camino de la certificación del sistema constructivo.

² Passivhaus Institut, "Criteria and Algorithms for Certified Passive House Components", 7.

17. Implementación de las modificaciones

En el desarrollo de este trabajo se plantearon una serie de modificaciones en el sistema constructivo original, bajo la premisa de acercarlo más a los niveles de calidad propuestos por el estándar de construcción. Las modificaciones propuestas giran en torno a tres aspectos:

- **Materialidad.** Implica el reemplazo de un material o producto por otro de mejores prestaciones térmicas, la adición de un nuevo material o la sustracción de uno existente. Es el caso del cambio de carpintería por una con certificación Passivhaus, propuesto para cumplir con el criterio de confort. También ocurre al incorporar una barrera de vapor en forjado, modificación planteada para cumplir con los criterios de humedad.
- **Dimensiones.** Significa redimensionar elementos para minimizar la transmisión de calor a través de la envolvente. Esta situación ocurre con los perfiles U de aluminio, que fueron redimensionados a efectos de reducir el valor de la transmitancia térmica lineal en encuentros de muro con forjado y con carpintería. Asimismo, sucede con el aislamiento térmico de forjados: se reemplazó la capa horizontal continua dentro del forjado por un refuerzo lateral, con el objetivo de aumentar la resistencia térmica del encuentro.
- **Desconexiones.** Implica separar elementos en contacto en la resolución original, para disminuir los riesgos de puente térmico. Ocurre en los encuentros de muro con forjado y con cubierta, donde, por ejemplo, se desplazó la subestructura del acabado interior para que no esté en contacto directo con otros materiales con conductividad térmica alta.

Si bien no fueron objeto de este estudio, la factibilidad técnica y económica de estos cambios debe ser tomada en cuenta al momento de implementarlos en obra. Al respecto, vale plantear algunas reflexiones surgidas en el transcurso de la investigación, que dan pie a futuras líneas de investigación.

Por un lado, podemos asumir que la modificación que mayores inconvenientes técnicos presenta es el redimensionamiento de los perfiles U de aluminio, porque afecta no solo el comportamiento térmico del sistema, sino también su comportamiento estructural. Es preciso entonces abordar a futuro el estudio estructural de las nuevas secciones para determinar si pueden seguir cumpliendo con su función original sin inconvenientes.

Por otro lado, desde el punto de vista económico, un cambio de ventana por otra de mejores prestaciones podría implicar un aumento en los costes de ese rubro, ya que no solo se debe adquirir el marco certificado, sino también el vidrio de altas prestaciones y el premarco de madera, además de aumentar el consumo de materiales sellantes.

En contraposición, algunos cambios presentan ventajas económicas, como el reemplazo del aislamiento térmico horizontal del forjado por un aislamiento térmico lateral de mayor sección. En esta situación, se consume menos material que en la situación original y, al mismo tiempo, se obtiene un mejor comportamiento térmico.

Las modificaciones en torno a las conexiones entre componentes podrían no generar ni un impacto económico ni un desafío técnico. Pero, en cualquier caso, son cambios que deben ser ensayados en obra. En ese sentido, vale recordar que el sistema constructivo es de reciente creación, y como tal, aún está siendo perfeccionado obra tras obra. Antes de encarar el proceso de certificación, se podría testear cada una de las modificaciones juntas o separadas, y así determinar si son compatibles con los demás aspectos que intervienen en una obra, y no solo con el aspecto higrotérmico.

Por último, existe un requisito dentro del estándar que no es comprobado a través de simulaciones, pero que sí se evalúa en el proceso de certificación y debe ser tenido en cuenta durante el proceso constructivo. Se trata de la exigencia de hermeticidad, necesaria para minimizar las pérdidas de calor por la envolvente. Los cambios planteados no deben en ningún caso alterar esta cualidad de los edificios construidos con este sistema. Dado que fue concebido para la construcción de edificios de consumo de energía casi nulo, la hermeticidad forma parte de sus premisas de diseño, característica revelada en el estudio de los detalles constructivos. Las modificaciones, por su parte, no solo no alteran esta premisa, sino que la refuerzan, al proponer mayor estanqueidad en las uniones de la carpintería con los muros.

En cualquier caso, ya sea que hablemos de hermeticidad o de impermeabilidad al vapor de agua, al viento o al agua líquida, lo presentado gráficamente en los detalles (que es lo que el Passivhaus Institut estudia en el proceso de certificación) debe traducirse materialmente en obra. Allí, componentes no vistos en los detalles, como las instalaciones sanitarias o eléctricas, pueden comprometer el buen funcionamiento de las barreras. En definitiva, el estudio del sistema constructivo no acaba en los detalles, sino que debe continuar en obra.

18. Futuras líneas de investigación y limitaciones encontradas

Resulta pertinente continuar investigando las posibles resoluciones del encuentro de muros con carpinterías, para que el sistema pueda cumplir con el criterio de confort del estándar. El estudio puede abarcar desde la simulación utilizando otros tipos de ventanas certificadas, hasta la simulación de distintas formas de conexión entre los dos componentes. En la discusión de los resultados, se planteó una posible línea de continuación basada en una solución avalada por el Passivhaus Institut. Además, en futuros estudios podrían incluirse otras soluciones superadoras a las planteadas en este trabajo, para que el sistema sea aún más eficiente energéticamente.

Por lo expuesto en el capítulo anterior, también resulta pertinente abordar a futuro el estudio de la factibilidad técnica y económica de convertir el sistema constructivo modular ligero en un sistema constructivo con certificado Passivhaus. Asimismo, de implementarse las modificaciones, se podría estudiar su comportamiento higrotérmico *in situ* mediante monitorización de los edificios construidos.

En relación a las limitaciones encontradas, vale mencionar que muchos artículos oficiales del Passivhaus Institut que podrían haber resultado útiles para el comprender los argumentos detrás del estándar, se encuentran disponibles solo para miembros de la International Passive House Association. Ante tal limitación, se tomó contacto con un experto Passivhaus para poder comprender aquellos aspectos de la certificación que no estaban explicados en el documento oficial.

En cuanto al software de simulación, se pudo disponer de una licencia de estudiante que permitió hacer uso de la mayor parte de las herramientas disponibles. Ahora bien, el proceso de simulación, como en cualquier software de similares características, requiere de un uso considerable de la memoria del ordenador que se utilice. En ese sentido, el nivel de resolución de la simulación, y con ello la precisión de los resultados obtenidos, se vio limitado por la capacidad del ordenador de ejecutar el programa sin inconvenientes y en tiempos razonables. La simulación de la difusión de vapor, por ejemplo, es un proceso con una duración considerable, superior a la duración de la simulación del flujo de calor. Por tal motivo, se tuvo que reducir el nivel de la resolución de la simulación para poder obtener resultados dentro de los plazos establecidos para la elaboración de este trabajo.

El tiempo en sí mismo se constituyó como una limitante más, ya que impidió continuar el estudio de las soluciones más adecuadas hasta encontrar aquella que satisficiera el criterio de confort, el único del estándar no cumplido en este trabajo. Dado que las modificaciones se plantearon en el marco de un proceso iterativo, cada cambio realizado en un encuentro implicaba una nueva simulación, interpretación de resultados y readaptación.

19. Reflexiones finales

Al describir el estado de la técnica en torno al problema planteado en este trabajo, se evidenció que utilizar sistemas constructivos de altas prestaciones energéticas ya no es una opción, sino una necesidad surgida del contexto normativo y legal, especialmente en países de la Unión Europea. Existen acuerdos internacionales, directivas europeas y legislaciones nacionales orientadas a la consecución de un parque edificatorio con consumo de energía casi nulo. La meta, en última instancia, es reducir el consumo energético y las emisiones de dióxido de carbono, aspectos en los que los edificios tienen una influencia destacable a nivel mundial y europeo.

Para hacer frente a tal desafío, el estándar de construcción Passivhaus se convirtió en una herramienta a la que profesionales del sector han acudido para validar el consumo casi nulo de los edificios y el comportamiento térmico óptimo de los componentes constructivos. Es un estándar con sustento científico, aplicado con distintos grados de éxito en variados contextos socioeconómicos y climáticos. Este trabajo se constituye como un nuevo aporte dentro del amplio abanico de investigaciones que abordan la aplicabilidad de este estándar de construcción. Ahora bien, vale destacar que el estudio de componentes constructivos no es un tema particularmente abundante en la literatura científica específica. Más bien, las investigaciones actuales, como se observó en el estado de la técnica, se circunscriben a analizar el edificio como un todo, y no se enfocan específicamente en valorar el comportamiento higrotérmico de los componentes constructivos. En ese sentido, esta investigación resulta particularmente innovadora. Además, se distingue por ser la primera en su tipo en abordar la evaluación de un sistema constructivo modular de aluminio extrusionado a ser utilizado en clima cálido templado.

Para concluir, podemos decir que obtener una certificación conforme a un estándar de construcción como Passivhaus implica que fabricantes, constructores y profesionales involucrados asumen la responsabilidad de respetarlo durante el proceso constructivo. El verdadero fin de este estándar, en definitiva, es lograr que se construyan cada vez más edificios de consumo de energía casi nulo, a base de materiales y componentes de óptimas prestaciones energéticas. Por eso, los resultados obtenidos en esta investigación habrán de adquirir verdadero valor no solo cuando se traduzcan en un certificado de reconocimiento internacional, sino también cuando sean utilizados en la optimización del sistema constructivo en obra. Solo así se podrá hacer una contribución concreta en la reducción del consumo de energía y las emisiones de dióxido de carbono de la edificación.

Bibliografía



- Asociación Española de Normalización. *Materiales y productos para la edificación. Propiedades higrotérmicas. Valores tabulados de diseño y procedimientos para la determinación de los valores térmicos declarados y de diseño*. UNE-EN-ISO 13370. Madrid: AENOR, 2017.
- Asociación Española de Normalización. *Comportamiento térmico de ventanas, puertas y persianas. Cálculo de la transmitancia térmica. Parte 2: Método numérico para los marcos*. UNE-EN-ISO 10077-2. Madrid: AENOR, 2020.
- Asociación Española de Normalización. *Puentes térmicos en edificación. Transmitancia térmica lineal. Métodos simplificados y valores por defecto*. UNE-EN-ISO 14683. Madrid: AENOR, 2020.
- Asociación Española de Normalización. *Componentes y elementos para la edificación. Resistencia térmica y transmitancia térmica. Método de cálculo*. UNE-EN-ISO 6946. Madrid: AENOR, 2021.
- Asociación Española de Normalización y Certificación. *Materiales y productos para la edificación. Propiedades higrotérmicas. Valores tabulados de diseño y procedimientos para la determinación de los valores térmicos declarados y de diseño*. UNE-EN-ISO 10456. Madrid: AENOR, 2012.
- Asociación Española de Normalización y Certificación. *Puentes térmicos en edificación. Flujos de calor y temperaturas superficiales. Cálculos detallados*. UNE-EN-ISO 10211. Madrid: AENOR, 2012.
- Asociación Española de Normalización y Certificación. *Características higrotérmicas de los elementos y componentes de edificación. Temperatura superficial interior para evitar la humedad superficial crítica y la condensación intersticial. Métodos de cálculo*. UNE-EN-ISO 13788. Madrid: AENOR, 2016.
- Atanasiu, Bogdan, Thomas Boermans, Andreas Hermelink, Sven Schimschar, Jan Grözinger, Markus Offerman, Kirsten Englund Thomsen, Jørgen Rose y Søren O. Aggerholm. *Principles for nearly zero-energy buildings: Paving the way for effective implementation of policy requirements*. Buildings Performance Institute Europe, 2011. https://www.bpie.eu/wp-content/uploads/2015/10/HR_nZEB-study.pdf
- Attia, Shady, Polyvios Eleftheriou, Flouris Xeni, Rodolphe Morlot, Christophe Ménézo, Vasilis Kostopoulos, Maria Betsi, Iakovos Kalaitzoglou, Lorenzo Pagliano, Maurizio Cellura, Manuela Almeida, Marco Ferreira, Tudor Baracu, Viorel Badescu, Ruxandra Crutescu y Juan María Hidalgo Betanzos. "Overview and future challenges of nearly zero energy buildings(nZEB) design in Southern Europe". *Energy and Buildings* 155 (2017): 439-458, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.09.043>

- Austrian Institute for Healthy and Ecological Building, ed. *Details for Passive Houses: New Buildings*. Basilea: Birkhäuser Verlag GmbH, 2018.
- Bastian, Zeno, Jürgen Schnieders, William Conner, Berthold Kaufmann, Lazlo Lepp, Zack Norwood, Andrew Simmonds e Ingo Theoboldt. "Retrofit with Passive House components". *Energy Efficiency* 15, no. 1 (2022): 10, <https://doi.org/10.1007/s12053-021-10008-7>
- Belal, Mohammed Fathi, Mohammed Hassanien Serror, Sherif Ahmed Mourad y Mohammed Masoud E.L. Saadawy. "Numerical Study of Seismic Behavior of Light-Gauge Cold-Formed Steel Stud Walls". *Journal of Constructional Steel Research* 174 (2020): 106307, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.106307>
- Bienvenido Huertas, David, Daniel Sánchez García, Carlos Rubio Bellido y Jesús A. Pulido Arcas. "Analysing the inequitable energy framework for the implementation of nearly zero energy buildings (nZEB) in Spain". *Journal of Building Engineering* 35 (2021): 102011, <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.102011>
- Blasco Laffón, Begoña, Emilia Blasco Laffón, José María Fernández Valdés, Juan Carlos Losada González y Carmen Viñas Arrebola. *Fundamentos físicos de la edificación II*. Madrid: Delta Publicaciones, 2008.
- Castro Martín, Carlos. *Aislamiento térmico en edificación*. Madrid: Fundación Escuela de la Edificación, 2008.
- Colclough, Shane, Oliver Kinnane, Neil Hewitt y Philip Griffiths. "Investigation of nZEB social housing built to the Passive House standard". *Energy & Buildings* 179 (2018): 344-359, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.06.069>
- Croiset, Maurice. *Humedad y temperatura en los edificios: Condensaciones y confort térmica de verano e invierno*. Barcelona; Editores Técnicos Asociados, 1976.
- D'Agostino, Delia y Livio Mazzarella. "What is a Nearly zero energy building? Overview, implementation and comparison of definitions". *Journal of Building Engineering* 21 (2019): 200-212, <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2018.10.019>
- Davies, J. Michael. "Light gauge steel cassette wall construction – theory and practice". *Journal of Constructional Steel Research* 62, no. 11 (2006): 1077-1086, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2006.06.028>
- Dirección General de Arquitectura, Vivienda y Suelo. *Código Técnico de la Edificación. Documento Básico HE: Ahorro de energía*. Ministerio de Fomento, 2019. <https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/HE/DBHE.pdf>
- Dirección General de Arquitectura, Vivienda y Suelo. *Archivos de datos de todas las zonas climáticas*. Consultado el 10 de junio de 2022.

https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/HE/CTEdatosMET_20140418.zip

Directiva 2002/91/CE del Parlamento Europeo y del Consejo del 16 de diciembre de 2002, relativa a la eficiencia energética de los edificios. Diario Oficial de las Comunidades Europeas L 1, 4 de enero de 2003, pp. 65-71.

Directiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de mayo de 2010, relativa a la eficiencia energética de los edificios. Diario Oficial de la Unión Europea L 153, 18 de junio de 2010, pp. 13-35.

Directiva (UE) 2018/844 del Parlamento Europeo y del Consejo de 30 de mayo de 2018 por la que se modifica la Directiva 2010/31/UE relativa a la eficiencia energética de los edificios y la Directiva 2012/27/UE relativa a la eficiencia energética. Diario Oficial de la Unión Europea L 156, 19 de junio de 2018, pp. 75-91.

Economidou, Marina, Valeria Todeschi, Paolo Bertoldi, Delia D'Agostino, Paolo Zangheri y Luca Castellazzi. "Review of 50 years of EU energy efficiency policies for buildings". *Energy and Buildings* 225 (2020): 110322, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110322>

Extrugasa. "Ficha técnica: Serie XP-60 TH". Consultado el 9 de junio de 2022. <https://www.extrugasa.com/wp-content/uploads/2016/05/ficha-tecnica-XP-60-TH.pdf>

Feist, Wolfgang. "The world's first Passive House, Darmstadt-Kranichstein, Germany". Passipedia. Instituto Passivhaus. 25 de mayo de 2022. [https://passipedia.org/examples/residential_buildings/multi-family_buildings/central_europe/the_world_s_first_passive_house_darmstadt-kranichstein_germany?s\[\]=kranichstein](https://passipedia.org/examples/residential_buildings/multi-family_buildings/central_europe/the_world_s_first_passive_house_darmstadt-kranichstein_germany?s[]=kranichstein)

Ferdous, Wahid, Yu Bai, Tuan Duc Ngo, Allan Manalo y Priyan Mendis. "New advancements, challenges and opportunities of multi-storey modular buildings – A state-of-the-art review". *Engineering Structure* 183 (2019): 883-893, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.01.061>

Figuereido, António, José Figueira, Romeu Vicente y Rui Maio. "Thermal comfort and energy performance: Sensitivity analysis to apply the Passive House concept to the Portuguese climate". *Building and Environment* 103 (2016): 276-288, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.03.031>

Fletcher, Martin, David Johnston, David Glew y James Parker. "An empirical evaluation of temporal overheating in an assisted living Passivhaus dwelling in the UK". *Building and Environment* 121 (2017): 106-118, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.05.024>

- Fokaides, Paris., Elias Christoforou, Milos Ilic y Agis Papadopoulos. "Performance of a Passive House under subtropical climatic conditions". *Energy and Buildings* 133 (2016): 14-31, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.09.060>
- Forde, Joe, Christina Hopfe, Robert McLeod y Ralph Evins. "Temporal optimization for affordable and resilient Passivhaus dwellings in the social housing sector". *Applied Energy* 261 (2020): 114383, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114383>
- Georgescu, Mircea, Viorel Ungureanu, Aurelian Gruin y Andra Floricel. "Building Cladding using Liner Trays: Experimental and Numerical Approach". *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 603, no. 2 (2019): 022051, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/603/2/022051>
- Gonzalo, Roberto y Rainer Vallentin. *Passive house design: Planning and design of energy-efficient buildings*. Detail Green Books, 2016.
- Hasan, Ala, Ayman Mohamed y Hamdy Mohamed. "Net- and Nearly- Zero Energy Buildings: A Review of the Definitions and Case Studies". En *Proceedings of the Sixth International Conference on Heating, Ventilation and Air-Conditioning*. Teherán: 2015. https://www.researchgate.net/publication/280443863_Net-and-Nearly-Zero-Energy-Buildings-A-Review-of-the-Definitions-and-Case-Studies
- Hermelink, Andreas, Sven Schimschar, Thomas Boermans, Lorenzo Pagliano, Paolo Zangheri, Roberto Armani, Karsten Voss y Eike Musali. *Towards nearly zero-energy buildings Definition of common principles under the EPBD Final report*. Ecofys, 2013. https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/nzeb_full_report.pdf
- Hermo Sánchez, Víctor Manuel. "Sistema constructivo industrializado in situ COTaCERO: transferencia tecnológica: construcción de depósitos-ejecución de viviendas en altura mediante paneles portantes de acero". Tesis doctoral. Universidad de A Coruña. 2011. <http://hdl.handle.net/2183/10028>
- Hermo Sánchez, Víctor. *Estructura modular para la construcción de edificaciones*. Patente española ES2716889, presentada el 15 de diciembre de 2017 y publicada el 29 de enero de 2020. https://consultas2.oepm.es/pdf/ES/0000/000/02/71/68/ES-2716889_B2.pdf
- Hermo Sánchez, Víctor. *Plano de detalles constructivos* [Plano]. 1:10 y 1:20. 2020.
- HTflux Engineering GmbH. "HTflux – the smart building physics software". HTflux. Consultado el 3 de mayo de 2022. <https://www.htflux.com/en/>
- International Passive House Association. "The global Passive House platform". 25 de mayo de 2022, https://passivehouse-international.org/index.php?page_id=65

Jutglar i Banyeras, Lluís. *Aislamiento térmico*. Barcelona: Ceac, 1998.

Linhares, Patricia, Víctor Hermo y Carolina Meire. "Environmental design guidelines for residential NZEBs with liner tray construction". *Journal of Building Engineering* 42 (2021): 102580, <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102580>

López Ochoa, Luis, Jesús Las Heras Casas, Luis López González y César García Lozano. "Environmental and energy impact of the EPBD in residential buildings in cold Mediterranean zones: The case of Spain". *Energy and Buildings* 150 (2017): 567-582, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.06.023>

Martínez Soto, Aner, Yarela Saldías Lagos, Valentina Marincioni y Emily Nix. "Affordable, Energy-Efficient Housing Design for Chile: Achieving Passivhaus Standard with the Chilean State Housing Subsidy". *Applied Sciences* 10, no. 21 (2020): 7390, <https://doi.org/10.3390/app10217390>

Mitchell, Rachel y Sukumar Natarajan. "Overheating risk in Passivhaus dwellings". *Building Services Engineering Research and Technology* 40, no. 4 (2019): 446-469, <https://doi.org/10.1177%2F0143624419842006>

Passivhaus Institut. "Component Database". Passive House. 26 de mayo de 2022. <https://database.passivehouse.com/en/components/>

Passivhaus Institut. "Component Database: Glazing edge bond SWISSPACER ULTIMATE". Passive House. 20 de junio de 2022. https://database.passivehouse.com/en/components/details/glazing_edge_bond/swisspacer-swisspacer-ultimate-1497sp01?lat=40.6818&lon=-3.9611&cz=NaN

Passivhaus Institut. "Component Database: Windows". Passive House. 19 de junio de 2022. <https://database.passivehouse.com/en/components/list/window?lat=40.6818&lon=-3.9611&cz=NaN>

Passivhaus Institut. "Component Database: Window SL82 Passiv 1.0". Passive House. 19 de junio de 2022. <https://database.passivehouse.com/en/components/list/window?lat=40.6818&lon=-3.9611&cz=NaN>

Passivhaus Institut. "Passive House requirements". Passive House. 25 de mayo de 2022. https://passivehouse.com/02_informations/02_passive-house-requirements/02_passive-house-requirements.htm

Passivhaus Institut. "Energy standards. Passive House Classic, Plus and Premium". Passive House. 25 de mayo de 2022. https://passiv.de/en/03_certification/02_certification_buildings/08_energy_standards/08_energy_standards.html

- Passivhaus Institut. "Certified Passive House Designers". Passive House. 25 de mayo de 2022. https://passiv.de/en/03_certification/04_certified-designers/04_certified-designers.htm
- Passivhaus Institut. "Certified Passive House Tradesperson". Passive House. 25 de mayo de 2022. https://passiv.de/en/03_certification/05_certified-tradesperson/05_certified-tradesperson.htm
- Passivhaus Institut. "Criteria and Algorithms for Certified Passive House Components: Opaque construction systems". Versión 3.1 del 7 de febrero de 2022. https://passiv.de/downloads/03_certification_criteria_construction_systems_en.pdf
- Pérez Valcárcel, Juan, Víctor Hermo y José Rodríguez Cheda. "A new building system: Structural aspects of COTaCERO system". *Structures and Architecture* 1 (2013): 1056-1063, <https://doi.org/10.1201/b15267>
- Pérez Valcárcel, Juan, Manuel Muñoz Vidal y Víctor Hermo. "Construcción izada: Condicionantes estructurales del sistema REVERSTOP". *Informes de la Construcción* 72, no. 559 (2020): e355, <https://doi.org/10.3989/ic.72993>
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. *2021 Global status report for buildings and construction: Towards a zero-emissions, efficient and resilient buildings and construction sector*. Nairobi: 2021. https://globalabc.org/sites/default/files/2021-10/GABC_Buildings-GSR-2021_BOOK.pdf
- Propuesta de Directiva del Parlamento Europeo y del Consejo, de 15 de diciembre de 2021, relativa a la eficiencia energética de los edificios (refundición).
- Proyectorpía S.L. "Proyectorpía: Memoria de calidades". Idealista. 26 de mayo de 2022. <https://www.idealista.com/documents/public/166801849>
- Recomendación (UE) 2016/1318 de la Comisión, de 29 de julio de 2016, sobre las directrices para promover los edificios de consumo de energía casi nulo y las mejores prácticas para garantizar que antes de que finalice 2020 todos los edificios nuevos sean edificios de consumo de energía casi nulo. Diario Oficial de la Unión Europea L 208, 2 de agosto de 2016, pp. 46-57.
- Rodríguez Soria, Beatriz, Javier Domínguez Hernández, José Pérez Bella y Juan del Coz Díaz. "Review of international regulations governing the thermal insulation requirements of residential buildings and the harmonization of envelope energy loss". *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 34 (2014): 78-90, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.03.009>
- Russo, P., G. Colaci de Vitis y G. Gentile. "A cost-effective building in the Mediterranean area: Passivhaus design and energy modelling". *IOP Conference Series*:

- Materials Science and Engineering* 609, no. 7 (2019): 072024, <https://doi.org/10.1088/1757-899x/609/7/072024>
- Rodríguez Vidal, Iñigo, Jorge Otaegi y Xabat Oregi. "Thermal Comfort in NZEB Collective Housing in Northern Spain". *Sustainability* 12, no. 22 (2020): 9630, <https://doi.org/10.3390/su12229630>
- Saldaña Márquez, H., J.M. Gómez Soberón, S.P. Arredondo Rea, J.L. Almaral Sánchez, M.C. Gómez Soberón y G. Rosell Balada. "The Passivhaus standard in the mediterranean climate: evaluation, comparison and profitability". *Journal of Green Building* 10, no. 4 (2015): 55-72, <https://doi.org/10.3992/jgb.10.4.55>
- Schnieders, Jürgen, Wolfgang Feist y Ludwig Rongen. "Passive Houses for different climate zones". *Energy and Buildings* 105 (2015): 71-87, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.07.032>
- Schnieders, Jürgen, Tim Delhey Eian, Marco Filippi, Javier Florez, Berthold Kaufmann, Stefanos Pallantzias, Monte Paulsen, Elena Reyes, Michael Wassouf y Shih Chieh Yeh. "Design and realisation of the Passive House concept in different climate zones". *Energy Efficiency* 13 (2019): 1561-1604, <https://doi.org/10.1007/s12053-019-09819-6>
- Soares, N., P. Santos, H. Gervásio, J.J. Costa y L. Simões da Silva. "Energy efficiency and thermal performance of lightweight steel-framed (LSF) construction: A review". *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 78 (2017): 194-209, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.066>
- Tabatabaei Sameni, Seyed Masoud, Mark Gaterell, Azadeh Montazami y Abdullahi Ahmed. "Overheating investigation in UK social housing flats built to the Passivhaus standard". *Building and Environment* 92 (2015): 222-235, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.03.030>
- Wang, Yang, Jens Kuckelkorn, Fu Yun Zhao, Hartmut Spliethoff y Werner Lang. "A state of art of review on interactions between energy performance and indoor environment quality in Passive House buildings". *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 72 (2017): 1303-1319, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.10.039>
- Wassouf, Michael. *De la casa pasiva al estándar Passivhaus: La arquitectura pasiva en climas cálidos*. Barcelona: Gustavo Gili, 2014.