# FACHADAS SOLARES TERMICAMENTE ACTIVAS MEDIANTE SOLUCIONES DE PANEL SANDWICH EN ACERO

Tesis Doctoral

Peru Elguezabal Esnarrizaga

Directores:

Dr. Jesús María Blanco Ilzarbe

Dr. José Antonio Chica Páez

Bilbao, Octubre 2020

eman ta zabal zazu

Universidad del País Vasco | Euskal Herriko Unibertsitatea

BILBOKO INGENIARITZA ESKOLA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE BILBAO

(c) 2020 Peru Elguezabal Esnarrizaga

# RESUMEN

Las fachadas solares térmicamente activas representan, actualmente, una tendencia y línea de desarrollo en continua evolución que está suscitando un gran interés en el sector de la edificación debido a su contribución como soluciones que incorporan fuentes renovables a edificios eficientes energéticamente.

El principal objetivo de la presente tesis es el de comprender y analizar las posibilidades de las fachadas solares como una alternativa viable en el ámbito de la edificación y de la eficiencia energética y, de forma explícita, proponer, cuantificar y evaluar una solución concreta que, concebida para ser una solución basada en la tecnología de paneles de fachada de acero, demuestre el potencial que tienen estas soluciones activas para ser consideradas como una propuesta fiable.

Se trata, por tanto, de contribuir a ampliar el conocimiento de soluciones de fachadas solares como la planteada, para las que la información y resultados disponibles resultan ser todavía escasos e insuficientes. La caracterización y cuantificación de los factores principales, como el rendimiento o la producción solar aprovechable, son datos necesarios para que este tipo de desarrollos puedan ser considerados como soluciones contrastadas y de utilidad, a fin de que puedan ser empleadas e incorporadas en los nuevos edificios y en aquellos que se pretende rehabilitar.

El desarrollo de la tesis supone una aproximación progresiva y por fases, analizando la tecnología propuesta desde su concepción más básica, contemplando los materiales y elementos fundamentales que componen la fachada solar, hasta alcanzar la aplicación del conjunto activo en un edificio real. Los pasos intermedios implican la consideración de un sistema de fachada compuesta por paneles sándwich industrializados, la combinación de estos con los componentes necesarios para resolver un circuito solar y la conexión de este sistema solar a equipos de producción de calor.

Por tanto, se inicia el proceso constatando que existen actualmente propuestas para plantear fachadas solares. Se trata de conceptos y diseños que definen estos sistemas, con diferentes grados de complejidad, combinando materiales y tecnologías variadas. De esta forma, se confirma el creciente interés en soluciones basadas en la energía solar, pero también se identifica que, las soluciones con fachadas solares, aunque existen, son todavía muy testimoniales y experimentales, por lo que no cuentan todavía con un grado de madurez suficiente y apenas se encuentran soluciones comerciales disponibles en el mercado.

A continuación, se plantea una solución de fachada solar que, tomando la tecnología de los paneles sándwich de acero como base, proponga una alternativa competitiva y con un alto grado de integración, pero, también, con suficiente potencial para alcanzar resultados relevantes en términos de captación solar, aprovechando las propiedades del acero en este ámbito.

La siguiente fase consiste en valorar alternativas a este concepto propuesto, contemplando el efecto de los diferentes parámetros de diseño y de operación del sistema en la respuesta de este en términos de rendimiento y de producción solar. Para ello, se desarrolla un estudio paramétrico empleando un modelo fluidodinámico validado con resultados experimentales. Como conclusión se identifican los parámetros que tienen mayor impacto en cuanto a rendimiento y producción, diferenciando aquellos que se definen con el diseño del conjunto de

aquellos parámetros dinámicos que, o bien vienen fijados por las condiciones ambientales, o bien pueden ser configurados al operar el sistema.

Siguiendo con el desarrollo y ampliando el enfoque más allá del panel de fachada solar, el siguiente paso consiste en analizar el funcionamiento de un prototipo de fachada solar en condiciones reales de funcionamiento. Para esto se cuenta con una extensa campaña experimental de más de 18 meses, contemplando tanto el funcionamiento de la fachada solar como elemento principal, como la interacción que tiene con un sistema completo de producción de calor operado por una bomba de calor. Esto permite caracterizar la respuesta de los elementos principales del sistema y demostrar las ventajas al combinar ambos componentes, fachada solar y bomba de calor, tanto para mejorar el rendimiento de la fachada como para obtener valores de rendimiento competitivos. Asimismo, se contextualizan los resultados obtenidos en el ámbito de las soluciones para fachadas solares similares, contrastando los datos monitorizados.

Para concluir, se estudia el impacto que el sistema desarrollado tiene en una aplicación de edificación. Se contemplan escenarios alternativos para valorar la contribución de la fachada solar y el conjunto en la reducción del consumo del edificio cuando se considera una rehabilitación empleando la solución tecnológica estudiada, resultando que el diseño propuesto representa una alternativa viable y competitiva a las tecnologías comparables y actualmente empleadas para la rehabilitación de edificios.

La conclusión principal que se puede extraer de toda la investigación llevada a cabo es que, puesto que una única tecnología o solución no puede ser considerada como idónea para resolver todos los escenarios de edificación y situaciones de rehabilitación, resulta necesario adoptar enfoques que sean sistémicos e integrales, combinando, según el caso, diferentes y variadas tecnologías para resolver cada escenario, comprendiendo la contribución de cada elemento al conjunto.

Resulta necesario, por tanto, plantear soluciones y sistemas competitivos, pero también flexibles, intercambiables y compatibles con otras tecnologías afines para que se puedan plantear diferentes combinaciones y configuraciones. En esta tesis se demuestra que la tecnología de fachadas solares basada en soluciones sándwich ligeras de acero, es una alternativa competitiva y viable que, junto con otras tecnologías, como las bombas de calor, ofrecen una contribución muy significativa para mejorar el rendimiento energético de los edificios.

# AGRADECIMIENTOS

Que el desarrollo de una tesis supone un gran esfuerzo interlectual y personal es algo que ya me habían advertido cuando inicié este proceso hace ya varios años. Y, tras haberlo experimentado en primera persona, no puedo más que confirmar la gran dedicación y sacrificio que han sido necesarios para poder alcanzar la meta final.

Completar esta investigación, sin dejar de lado gran cantidad de compromisos profesionales y personales, a cada cual más exigente, ha representado un gran desafío con varios frentes abiertos durante todos estos años y, de forma muy significativa, en esta etapa final.

Sin duda, todo esto no habría sido posible sin sacrificar una parte muy importante de mi vida familiar, así que lo primero que me viene a la mente al hablar de agradecimiento son esas dos personas que más cerca tengo y que, sin cuyo apoyo incondicional, esto no habría sido posible. Mis chicas: Miren e Ibone. Quiero daros las gracias por todos esos ánimos que me habéis trasladado, la energía transmitida y, sobre todo, por vuestra comprensión y complicidad en todos estos compromisos y ausencias.

Asimismo, quiero agradecer a mis directores Jesús Mari y Josean, por su apoyo y la necesaria guía que me han proporcionado para poder superar los diferentes obstáculos y dificultades que han ido apareciendo por el camino. Contar con vuestro apoyo y amplia experiencia me ha permitido afrontar esta tarea con mucha más confianza gracias a vuestro respaldo y cercanía.

Agradecer también a todas las personas, colaboradores y colegas que, de forma directa o indirecta, habéis contribuido en este desarrollo: Compañer@s de Tecnalia, de Kubik, del clúster, de proyectos, coautores, colegas de viaje y de taxi… A todos aquellos con los que he tenido la oportunidad de trabajar de forma conjunta, aprender, acertar, fallar y, en definitiva, avanzar en diferentes ámbitos de la investigación. Compartir experiencias me ha permitido crecer profesional y personalmente y, en mayor o menor medida, ha influenciado el desarrollo de este documento.

Finalmente quiero dar las gracias a mi familia y amigos, en especial a mi Aita y mi Ama, por animarme, apoyarme y enseñarme a seguir adelante y por despertar la curiosidad que ha guiado mi forma de afrontar la vida en general y en este estudio en particular.

Eskerrik asko danoi bihotz bihotzez!!

# BREVE CURRICULUM

Peru Elguezabal Esnarrizaga (Bilbao, 1978)

Ingeniero Industrial por la Escuela de Ingeniería de Bilbao. (UPV – EHU)

Investigador senior del área de Envolventes Activas y Adaptativas de la División de Building Technologies de TECNALIA. Cuenta con 13 años de experiencia como investigador y gestor de proyectos, con una experiencia profesional previa de 3 años en empresas constructoras y en la industria del automóvil.

Profesor Asociado en la misma Escuela de Ingeniería desde el año 2012 en el Departamento de Ingeniería Eléctrica impartiendo la asignatura de "Análisis y Funcionamiento de Máquinas Eléctricas".

Con experiencia investigadora en proyectos tanto de nivel nacional como internacional en programas públicos, así como con contratos directos con empresas industriales, se ha centrado en el desarrollo y adecuación de productos innovadores para la construcción, específicamente en la eficiencia energética y la sostenibilidad de las envolventes. En este ámbito ha participado como investigador principal o colaborador en 24 proyectos de investigación.
Es coautor en 13 artículos científicos (5 JCR, 11 SJR), 5 libros, 1 capítulo, 22 contribuciones a congresos internacionales, 4 patentes y 1 modelo de utilidad.

Se detallan a continuación las principales contribuciones científicas alineadas con el desarrollo de la presente tesis.

Publicaciones:


- Elguezabal, P., Lopez, A., Blanco, J. M., & Chica, J. A. (2020). CFD model-based analysis and experimental assessment of key design parameters for an integrated unglazed metallic thermal collector façade. Renewable Energy, 146, 1766–1780. https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.07.151
- Elguezabal, P., Lopez, A., Blanco, J. M., & Chica, J. A. (2020). Assessment on the Efficiency of an Active Solar Thermal Facade: Study of the Effect of Dynamic Parameters and Experimental Analysis When Coupled / Uncoupled to a Heat Pump. Energies, 13 (3) (597). https://doi.org/https://doi.org/10.3390/en13030597
- Elguezabal, P., Lopez, A., Blanco, J. M., & Chica, J. A. (2019). New concept of solar collector integrated into a sandwich panel as an active façade; CFD based parametric assessment and case study. DYNA, 94, 691–698. https://doi.org/ http://dx.doi.org/10.6036/9274
- Elguezabal, P., Lopez, A., Blanco, J.M., Chica, J.A. (2019). Parametric assessment of a building active façade by means of a combined metallic sandwich panel with an unglazed solar collector. MATEC Web Conf. 282 02046 (2019). DOI: https://doi.org/10.1051/matecconf/201928202046
- Arregi, B., Elguezabal, P., & Álvarez, I. (2019). Composite polymeric materials as an alternative to aluminum for improved energy performance of ventilated façade systems. Journal of Physics: Conference Series, 1343. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1343/1/012196

- Aprile, M.; Scoccia, R.; Dénarié, A.; Kiss, P.; Dombrovszky, M.; Gwerder, D.; Schuetz, P.; Elguezabal, P.; Arregi, B. (2019). District power-to-heat/cool complemented by sewage heat recovery. Energies 2019, 12, (364). DOI 10.3390/en12030364
- Elguezabal, P., Arregi, B. (2018). An analysis of the potential of envelope-integrated solar heating and cooling technologies for reducing energy consumption in European climates. Journal of Facade Design and Engineering. Vol. 6, nº 2 (2018), 085-094. https://doi.org/10.7480/jfde.2018.2.2102.
- Elguezabal, P., Garay, R., & Martin, K. (2017). Experimentation under real performing conditions of a highly integrable unglazed solar collector into a building façade. Energy Procedia (Vol. 122). https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.395

Ponencias:

- Elguezabal, P., Lopez, A., Blanco, J.M., Chica, J.A. (2019). Parametric assessment of a building active façade by means of a combined metallic sandwich panel with an unglazed solar collector. Central European Symposium on Building Physics 2019. Prague, Czech Republic, 2 - 5 September 2019. MATEC Web of Conferences 282, 02046 (2019) https://doi.org/10.1051/matecconf /201928202046
- Elguezabal, P., Lopez, A., Blanco, J.M., Chica, J.A. (2019). Thermal modelling of an active façade integrating a metallic unglazed thermal collector. Congress on Numerical Methods in Engineering (CMN 2019), Guimarães, Portugal, July 01-03, 2019. Congress on Numerical Methods in Engineering - CMN 2019. Ebook: ISBN: 978-989-54496-0-6
- Elguezabal, P., Arregi, B., Schuetz, P., Gwerder, D., Scoccia, R., Tsatsakis, K., Biosca, J., Bortkiewicz, A., Waser, R., Sturzenegger, D. (2018). Review of the European dwelling stock and its potential for retrofit interventions using solar-assisted heating and cooling. REHABEND 2018. Construction Pathology, Rehabilitation Technology and Heritage Management. May 15-18, 2018. Cáceres, Spain. ISBN: 978-84-697-7033-7. pp 1780-1791
- Schuetz P., Scoccia R., Gwerder D., Waser R., Sturzenegger D., Elguezabal P., Arregi B., Aprile M., Worlitschek J. (2018). Fast simulation platform for retrofitting measures in residential heating. Cold Climate HVAC 2018. The 9th International Cold Climate Conference. Sustainable new and Renovated buildings in cold climates. Kiruna Sweden 12-15 March. Libro de Ponencias; ISBN 978-3-030-00661-7 pp 713 – 723

Patentes:

- Elguezabal P.; Astudillo J.; Arregui B.; Garay R.; Blanco J.M.; López A. (2019). Modular thermal transfer hydraulic system. Solicitud: EP19383112.0 / Envío: 300346064 / Fecha: 13/12/2019. Solicitud de Patente Europea.

# GLOSARIO

| | | |
|---|---|---|
| $Q_u$ | Energía útil captada por el colector solar | kWh / kJ |
| $A_c$ | Superficie efectiva del colector solar | $m^2$ |
| $I_{sol}$ | Radiación solar incidente en el plano del colector | $W/m^2$ |
| $T_{amb}$ | Temperatura ambiente | °C |
| $T_{in}$ | Temperatura de entrada del fluido | °C |
| $T_{out}$ | Temperatura de salida del fluido | °C |
| $F_R$ | Factor de evacuación de calor | (-) |
| $U_L$ | Coeficiente de transferencia de calor | $W/(m^2K)$ |
| $F_R\ U_L$ | Factor de pérdida de calor del colector | $W/(m^2K)$ |
| $F_R\ \alpha$ | Factor de ganancia máxima del colector | (-) |
| $Q_i$ | Ganancia térmica en un colector solar de alta inercia | kWh / kJ |
| $Q_l$ | Pérdida térmica en un colector solar de alta inercia | kWh / kJ |
| $Q_s$ | Factor que representa la alta inercia térmica del colector | kWh / kJ |
| $Q_{cond}$ | Energía transferida por conducción | kWh / kJ |
| $Q_{conv}$ | Energía transferida por convección | kWh / kJ |
| $Q_{rad}$ | Energía transferida por radiación | kWh / kJ |
| $Q_{rad,S}$ | Energía transferida por radiación solar | kWh / kJ |
| $Q_{rad,L}$ | Energía transferida por radiación infrarroja | kWh / kJ |
| $Q_{rain}$ | Calor transferido por la lluvia al colector | kWh / kJ |
| $Q_{lat}$ | Calor latente debido a cambios de fase | kWh / kJ |
| $Q_{Inter}$ | Transferencia de calor en un intercambiador | kWh / kJ |
| $I_{radAbs}$ | Radiación absorbida por una superficie dada | $W/m^2$ |
| $Q_{Sol}$ | Radiación diaria acumulada por el colector | $kWh/m^2$ |
| $\dot{m}$ | Flujo másico | kg/s |
| $e_s$ | Espesor de chapa | mm |
| $e_i$ | Espesor de aislamiento | mm |
| $e_c$ | Espesor de cámara de aire | mm |
| $e_p$ | Espesor de pared de tubo | mm |
| S | Sección de tubo | $m^2$ |
| $D_i$ | Diámetro interior del tubo | mm |
| $D_p$ | Distancia entre tubos paralelos | mm |
| $D_e$ | Profundidad del tubo respecto de la chapa exterior | mm |
| $C_w$ | Calor específico del fluido | kJ/kg K |
| $C_L$ | Parámetro variable (ecuaciones (13) y (14)) | 1/m |
| L | Longitud de panel | m |
| U | Velocidad del viento | m/s |
| $D_w$ | Dirección del viento | ° |
| $T_m$ | Temperatura media del fluido | °C |
| $T_s$ | Temperatura superficial de la chapa / absorbedor | °C |
| $T_{sky}$ | Temperatura del firmamento | °C |
| $T_p$ | Temperatura de pared de tubo | °C |
| $T_f$ | Temperatura del fluido | °C |
| F’ | Factor de eficiencia del colector | (-) |
| F | Eficiencia estándar de la aleta para secciones rectas | (-) |
| $q_i$ | Flujo de calor absorbido por la superficie | $kW/m^2$ |
| $q_{rad}$ | Flujo de calor emitido por radiación | $kW/m^2$ |
| $q_{f,c}$ | Flujo de calor emitido por convección forzada | $kW/m^2$ |
| $q_{n,c}$ | Flujo de calor emitido por convección natural | $kW/m^2$ |

| | | |
|---|---|---|
| $q_{air}$ | Flujo de calor emitido por una superficie al aire exterior | $kW/m^2$ |
| $q_f$ | Flujo de calor absorbido por el fluido | $kW/m^2$ |
| $h_W$ | Coeficiente de convección entre la chapa y el aire exterior | $W/(m^2K)$ |
| $h_{W,n}$ | Coeficiente de convección natural | $W/(m^2K)$ |
| $h_{W,f}$ | Coeficiente de convección forzada | $W/(m^2K)$ |
| $h_f$ | Coeficiente de convección entre tubo y fluido | $W/(m^2K)$ |
| Pr | Número de Prandlt | (-) |
| Re | Número de Reynolds | (-) |
| V | Velocidad del fluido dentro del tubo | m/s |
| $T_{ST}$ | Temperatura media en el tanque solar | °C |
| $T_{ST-S}$ | Temperatura superior en el tanque solar | °C |
| $T_{DACS}$ | Temperatura media en el tanque de ACS | °C |
| $T_{inACS}$ | Temperatura de entrada en el circuito exterior de ACS | °C |
| $T_{outACS}$ | Temperatura de salida en el circuito exterior de ACS | °C |
| $T_{inA}$ | Temperatura de entrada en el circuito exterior de aire | °C |
| $T_{outA}$ | Temperatura de salida en el circuito exterior de aire | °C |
| $T_{room}$ | Temperatura interior en la estancia | °C |
| $Q_H$ | Calor entregado por el condensador de la bomba de calor | kWh |
| $Q_{HPACS}$ | Energía útil de la Bomba de calor a la Carga de ACS | kWh |
| $Q_{HPCAL}$ | Energía útil de la Bomba de calor a la Carga de Calefacción | kWh |
| $W_C$ | Consumo eléctrico de la bomba de calor | kWh |
| $W_{aux}$ | Consumo eléctrico de elementos auxiliares | kWh |
| $W_{FS}$ | Consumo eléctrico del sistema de impulsión de la fachada solar | kWh |
| $Pot_{HP}$ | Potencia de la bomba de calor | kW |
| $Pot_{HPACS}$ | Potencia de la bomba de calor para producción de ACS | kW |
| $Pot_{HPCAL}$ | Potencia de la bomba de calor para producción de calefacción | kW |
| $Prod_u$ | Producción instantánea de la fachada solar | $W/m^2$ |
| $PR_{ACS}$ | Producción diaria del sistema para ACS | kWh |
| $PR_C$ | Producción diaria del sistema para Calefacción | kWh |
| PMAE | Predicción del Error Medio Absoluto / Predicted Mean Absolute Error | % |
| COP | Rendimiento de la bomba de calor / Coeficient of Performance | (-) |
| $COP_{MAX}$ | COP máximo únicamente con la electricidad en la b. de calor | (-) |
| $COP_{FS}$ | COP considerando la bomba de calor y la fachada solar | (-) |
| $COP_{SYS}$ | COP contemplando todos los consumos asociados al sistema | (-) |
| $COP_{GSHP}$ | COP para una bomba de calor por geotermia | (-) |
| $COP_{ASHP}$ | COP para una bomba de calor por aerotermia | (-) |
| Dem | Demanda de energía en un edificio | kWh |
| Gan | Ganancias de energía en un edificio | kWh |
| Per | Pérdidas de energía en un edificio | kWh |
| $Gan_{int}$ | Ganancias internas de energía en un edificio | kWh |
| g | Factor solar | % |
| H | Factor de pérdida de calor | W/K |
| C | Factor de capacidad térmica | J/K |
| U | Transmitancia térmica | $W/m^2K$ |
| $H_{conducción}$ | Factor de pérdida de calor por conducción | W/K |
| $H_{PtesTerm}$ | Factor de pérdida de calor por puentes térmicos | W/K |
| $H_{convección}$ | Factor de pérdida de calor por convección | W/K |
| $U_{Fac}$ | Transmitancia térmica para la fachada | $W/m^2K$ |
| $U_{Cub}$ | Transmitancia térmica para la cubierta | $W/m^2K$ |
| $U_{For}$ | Transmitancia térmica para el forjado | $W/m^2K$ |
| $U_{Ven}$ | Transmitancia térmica para las ventanas y huecos | $W/m^2K$ |

| | | |
|---|---|---|
| $A_{Fac}$ | Superficie de fachada | $m^2$ |
| $A_{Cub}$ | Superficie de cubierta | $m^2$ |
| $A_{For}$ | Superficie de forjado | $m^2$ |
| $A_{Ven}$ | Superficie de ventanas y huecos | $m^2$ |
| $N_{Vent}$ | Factor de renovación de aire en vivienda por ventilación | renov./h |
| $N_{Inf}$ | Factor de renovación de aire en vivienda por infiltraciones | renov./h |
| $V_{Aire}$ | Volumen de aire en la vivienda | $m^3$ |
| $Cp_{Aire}$ | Calor específico del aire | J/kgK |
| $g_{S/E/O/N}$ | Factor solar en orientación sur / este / oeste / norte | % |
| $I_{S/E/O/N}$ | Radiación solar incidente en orientación sur/ este / oeste / norte | $W/m^2$ |
| $F_{marco}$ | Factor de marco en ventanas | (-) |

**Símbolos griegos**

| | | |
|---|---|---|
| $\Lambda$ | Conductividad | W/(m K) |
| $\lambda_s$ | Conductividad de la chapa | W/(m K) |
| $\lambda_i$ | Conductividad del aislamiento | W/(m K) |
| $\lambda_p$ | Conductividad del tubo | W/(m K) |
| $\lambda_f$ | conductividad térmica del fluido | W/(m K) |
| H | Rendimiento Colector solar | % / 0-1 |
| $\eta_{FA}$ | Rendimiento Fachada Activa | % / 0-1 |
| $\eta_{FA-HP}$ | Rendimiento Fachada Activa acoplada a Bomba de calor | % / 0-1 |
| $\alpha$ | Absortividad | (-) |
| $\varepsilon$ | Emisividad | (-) |
| $\sigma$ | Constante de Stefan Boltzman | $W/(m^2K^4)$ |
| $\tau$ | Tiempo de resistencia hidráulica | s |
| $\nu_k$ | Viscosidad cinemática | $m^2/s$ |
| $\mu$ | Viscosidad | Kg/(m s) |
| $\rho_{Aire}$ | Densidad del aire | $kg/m^3$ |

**Acrónimos**

| | |
|---|---|
| NZEB | Edificios de Consumo Energético Casi Nulo / Nearly Zero Energy Buildings |
| RES | Fuentes de energía removable / Renewable Energy Sources |
| SF | Fachada Solar / Solar Façade |
| ASTF | Fachada Solar Térmicamente Activa / Active Solar Thermal Façade |
| ASF | Fachada Solar Activa / Active Solar Façade |
| HVAC | Sistema de Climatización y Ventilación / Heating, Ventilation and Air Conditioning |
| BISTS | Sistemas Térmicos Solares Integrados en Edificios / Building Integrated Solar Thermal Systems |
| RANS | Ecuaciones de Reynolds-averaged Navier-Stokes |
| SIMPLE | Método Semi Implícito para Ecuaciones relacionadas con la Presión / Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations |

| | |
|---|---|
| ACS | Agua Caliente Sanitaria |
| CFD | Fluido Dinámica Computacional / Computer Fluid Dynamics |
| Abs | Absorbedor |
| $Ch_e$ | Chapa exterior |
| $Ch_i$ | Chapa interior |
| Tu | Conducto o tubo |
| Ais | Material aislante |
| HP | Bomba de calor /Heat Pump |
| SAHP | Sistema de Bomba Calor con Contribución Solar / Solar Assisted Heat Pump |
| IDAE | Instituto para la Diversificación y ahorro de la Energía |
| EVE | Ente Vasco de la Energía |
| BSO | Building Stock Observatory |
| SFH | Vivienda unifamiliar / Single Family House |
| MFH | Vivienda colectiva / Multi Family House |

# INDICE

RESUMEN ..... 3
AGRADECIMIENTOS ..... 5
BREVE CURRICULUM ..... 6
GLOSARIO ..... 8
CAPITULO I. Contexto y estado del arte ..... 5
1. CONTEXTO ..... 6
1.1. Sector de la construcción y Eficiencia Energética ..... 6
1.2. La envolvente de los edificios. Función y entidad ..... 9
1.3. Incorporación de sistemas energéticos basados en renovables para conseguir edificios más sostenibles ..... 12
1.4. La industrialización como forma de resolver la construcción moderna ..... 13
1.5. La oportunidad asociada a las envolventes que se "activan" ..... 15
2. ESTADO DEL ARTE ..... 18
2.1. Colectores Solares Térmicos ..... 18
2.1.1 Clasificación de sistemas de colectores solares ..... 19
2.1.2 Comportamiento y Rendimiento de los colectores ..... 23
2.1.3 Mercado global de colectores solares térmicos ..... 28
2.2. Soluciones constructivas para fachadas ligeras empleando acero ..... 30
2.2.1 Clasificación de sistemas de fachada ligera en acero ..... 30
2.2.2 Comportamiento térmico de las fachadas ligeras en acero ..... 33
2.2.3 Potencial de fachadas en acero para desarrollos en colectores integrados e industrializados ..... 35
2.3. Colectores solares integrados en edificios ..... 37
2.3.1. Fachadas solares, activas y adaptativas ..... 37
2.3.2. Integración del panel en el plano vertical: La fachada ..... 38
2.3.3. Experiencias previas con sistemas de fachadas solares ..... 42
2.3.4. Integración con equipos térmicos. Bombas de calor. ..... 47
3. CONCLUSIONES ..... 53
4. REFERENCIAS ..... 55
CAPITULO II. Propuesta de desarrollo de Fachada Solar Activa a través de un colector no vidriado integrado en un panel sándwich ..... 66
1. INTRODUCCION ..... 67
2. PROPUESTA DE NUEVO DISEÑO DE COLECTOR SOLAR INTEGRADO EN FACHADA ..... 68
2.1. Tipología del colector. Concepto basado en el panel sándwich ..... 68

2.2. Análisis de los elementos principales de la fachada solar térmicamente activa: panel sándwich y circuito hidráulico ..... 69
3. ANALISIS DE ALTERNATIVAS PARA EL DISEÑO DE LA FACHADA ACTIVA ..... 71
3.1. Factores principales en el diseño del elemento panel ..... 72
3.1.1. El absorbedor ..... 73
3.1.2. Chapas metálicas ..... 75
3.1.3. Aislamiento ..... 76
3.1.4. Dimensiones principales del panel y solución modular prevista ..... 77
3.2. Factores principales en el diseño del circuito hidráulico ..... 80
3.2.1. Conductos longitudinales ..... 80
3.2.2. Configuración Circuito hidráulico ..... 82
3.2.3. Caudal ..... 84
3.2.4. Fluido ..... 84
3.3. Solución combinada de panel y circuito hidráulico ..... 85
3.3.1. Posición relativa del conducto frente al absorbedor ..... 86
3.3.2. Interacción entre el circuito hidráulico y el panel ..... 91
3.3.3. Circuito solar completo con depósito de almacenamiento térmico ..... 93
4. MATERIALIZACIÓN DE LA SOLUCIÓN EN UN PANEL MODULAR ..... 94
5. ANALISIS DE ALTERNATIVAS. PARAMETROS Y SU INFLUENCIA ..... 100
5.1. Factores que determinan la respuesta del sistema de fachada activa ..... 100
5.2. Parámetros a analizar ..... 104
5.2.1. Parámetros de diseño del sistema ..... 106
5.2.1.1. Del panel ..... 106
5.2.1.2. Del circuito ..... 108
5.2.2. Parámetros exteriores con influencia en el rendimiento ..... 110
5.2.2.1. Dinámicos de configuración ..... 111
5.2.2.2. Dinámicos ambientales ..... 112
5.3. Planteamiento del estudio paramétrico ..... 112
5.3.1. Modelo teórico ..... 113
6. CONCLUSIONES ..... 115
7. REFERENCIAS ..... 116
CAPITULO III. Estudio y análisis de la nueva solución de fachada activa ..... 120
1. INTRODUCCION ..... 121
2. MODELADO PARA REALIZAR EL ANÁLISIS PARAMÉTRICO ..... 122
2.1. Modelo CFD ..... 123
2.1.1. Modelo físico ..... 123

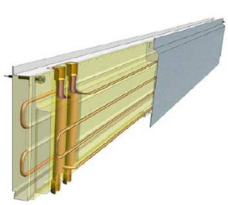
2.1.2. Geometría y mallado ..... 127
2.1.3. Escalado del modelo ..... 129
3. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DEL MODELO ..... 132
3.1. Infraestructura experimental e instalación piloto ..... 132
3.2. Investigación y validación experimental del modelo ..... 136
4. ESTUDIO PARAMÉTRICO ..... 140
4.1. Efecto de los parámetros de diseño ..... 141
4.1.1. Alternativas para el panel sándwich ..... 141
4.1.1.1. Chapas metálicas ..... 141
4.1.1.2. Absortividad del absorbedor ..... 143
4.1.1.3. Material aislante ..... 144
4.1.1.4. Cámara de aire en solución sin aislamiento ..... 146
4.1.2. Alternativas para el circuito hidráulico ..... 146
4.1.2.1. Sistema de conductos ..... 146
4.1.2.2. Longitud del panel ..... 149
4.1.2.3. Mezcla del fluido calor portador ..... 150
4.2. Efecto de los parámetros dinámicos ..... 151
4.2.1. Parámetros dinámicos de configuración ..... 152
4.2.1.1. Caudal y temperatura de impulsión ..... 152
4.2.2. Parámetros dinámicos ambientales ..... 153
4.2.2.1. Temperatura ambiente y radiación solar ..... 153
4.2.2.2. Velocidad del viento ..... 154
5. CURVAS DE CARACTERIZACION DEL PANEL ..... 155
5.1. Curvas características ..... 155
6. ANALISIS DE RESULTADOS DEL ESTUDIO PARAMETRICO ..... 157
6.1. Parámetros de diseño ..... 157
6.2. Parámetros dinámicos ..... 160
7. CONCLUSIONES ..... 163
8. REFERENCIAS ..... 166
CAPITULO IV. Campaña experimental en condiciones reales de uso de la fachada activa ..... 168
1. INTRODUCCION ..... 169
2. OBJETIVOS DE LA EXPERIMENTACIÓN ..... 171
3. DEFINICIÓN DE LA CAMPAÑA EXPERIMENTAL EN KUBIK ..... 172
3.1. Descripción y Localización del edificio ..... 172
3.1.1. Implantación del sistema en el edificio. Programa experimental ..... 175
3.1.2. Cargas térmicas consideradas ..... 178

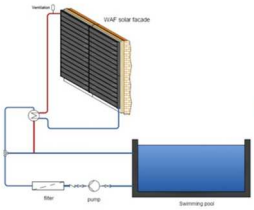
3.1.3. Esquema de principio del sistema combinando fachada activa y bomba de calor 179
3.1.4. Sistema de control ... 186
4. METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE DATOS ... 190
4.1. Variables a considerar ... 190
4.2. Caracterización de los componentes principales del sistema: fachada activa a modo de colector solar y bomba de calor ... 191
4.2.1. Fachada activa a modo de colector solar ... 192
4.2.2. Bomba de calor ... 192
4.3. Programa experimental, secuencias de ensayos y modos de funcionamiento a analizar ... 194
4.3.1. Análisis de la fachada activa dentro del circuito solar aislado ... 195
4.3.2. Análisis del sistema combinado ... 196
5. DETALLE DE LA CAMPAÑA EXPERIMENTAL ... 201
5.1. Resultados experimentales del circuito solar con la fachada activa ... 201
5.1.1. Consumo eléctrico asociado a la bomba de circulación del circuito solar ... 208
5.1.2. Influencia del depósito de almacenamiento para el circuito solar ... 209
5.1.3. Principales conclusiones de la experimentación con la fachada activa funcionando de forma aislada ... 210
5.2. Resultados de los ensayos para el sistema combinado de circuito solar con fachada activa y bomba de calor. Análisis Comparativo ... 211
5.2.1. Planteamiento del análisis comparativo ... 211
5.2.2. Selección de días comparables y resultados del análisis comparativo ... 215
5.2.3. Principales conclusiones de la experimentación con el sistema combinado ... 220
5.3. Resultados experimentales para el sistema combinado de circuito solar con fachada activa y bomba de calor. Campaña experimental completa ... 226
6. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA CAMPAÑA EXPERIMENTAL ... 233
7. CONCLUSIONES ... 237
8. REFERENCIAS ... 238
CAPITULO V. Conclusiones. Aplicación del sistema de fachada activa ... 240
1. INTRODUCCION ... 241
2. REVISIÓN DE LOS PRINCIPALES RESULTADOS OBTENIDOS EN LOS CAPITULOS PREVIOS. 243
3. PLANTEAMIENTO DEL CASO DE ESTUDIO ... 245
3.1. Definición de la demanda ... 246
3.1.1. Demanda de ACS ... 248
3.1.2. Demanda de calefacción ... 249

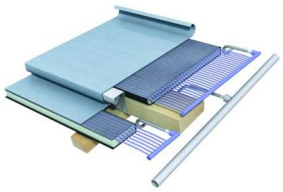
3.2. Definición de la producción de calor y de la contribución de la fachada solar. Estimación del consumo del edificio ..... 253
3.2.1. Consideraciones sobre la bomba de calor ..... 256
3.3. Selección de un caso de referencia sobre el que plantear escenarios alternativos . 257
3.3.1. Resultados para el caso de referencia ..... 262
4. ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS PARA CONSIDERAR DIFERENTES ESCENARIOS ..... 267
4.1. Factores que afectan a la demanda del edificio ..... 268
4.1.1. Tipología y tamaño de la vivienda ..... 268
4.1.2. La ubicación ..... 270
4.1.3. La ocupación ..... 270
4.2. Factores que afectan a la producción de los equipos de calor ..... 271
4.2.1. Características del sistema activo de fachada ..... 271
4.2.2. Características del sistema de producción ..... 272
5. INCIDENCIA DEL SISTEMA ACTIVO CONTEMPLANDO ESCENARIOS ALTERNATIVOS ..... 273
5.1. Resultados para los escenarios planteados ..... 273
5.1.1. Factores que afectan a la demanda ..... 273
5.1.2. Factores que afectan a la producción ..... 278
5.2. Discusión de los resultados ..... 281
5.3. Escenarios alternativos complementarios ..... 283
6. BENEFICIOS DE LA SOLUCIÓN EN TÉRMINOS DE AHORRO ENERGÉTICO Y ECONOMICO. 288
7. CONCLUSIONES PRINCIPALES DE LA TESIS ..... 295
7.1. Contribuciones realizadas ..... 298
7.2. Futuras líneas de investigación ..... 301
8. REFERENCIAS ..... 303

# CAPITULO I. Contexto y estado del arte

1. CONTEXTO
2. ESTADO DEL ARTE
3. CONCLUSIONES
4. REFERENCIAS





*El objetivo principal de este primer capítulo es hacer una revisión del contexto y entorno actual para al sector edificatorio y residencial, considerando la posibilidad de plantear fachadas solares que combinen la tecnología de colectores solares térmicos con las fachadas ligeras de acero.*
*Como resultado se va a constatar que, a pesar de que existen ciertas experiencias en este ámbito, los desarrollos resultan ser todavía escasos y testimoniales sin que se pueda evidenciar suficientemente el potencial beneficio que este tipo de sistemas pueden proporcionar.*

# 1. CONTEXTO

## 1.1. Sector de la construcción y Eficiencia Energética

Desde que el Informe Brundtland introdujera en 1987 el debate acerca del crecimiento de la sociedad basado en un *Desarrollo Sostenible* [1], definido como *aquel que satisface las necesidades del presente sin comprometer las necesidades de las futuras generaciones,* el concepto de la sostenibilidad se ha ido madurando como un principio común de la sociedad para poder avanzar hacia un futuro mejor, pero también como una oportunidad de redefinir el modelo de crecimiento basándose en los tres principios fundamentales del desarrollo sostenible: medioambiental, económico y social.

La versión más actualizada que representa esta visión son los "*Objetivos de Desarrollo Sostenible*" que Naciones Unidas definió en el año 2015 [2] estableciendo los objetivos (17 en total) y metas (169) a modo de agenda estratégica hacia un desarrollo más sostenible. Los 17 objetivos engloban tanto aspectos sociales vinculados a las desigualdades económicas, la salud o la educación, como medioambientales para combatir el cambio climático, preservar los océanos y los bosques y económicos, basados en crecimientos inclusivos y sostenibles.

A este respecto, la incidencia del sector de la construcción en el contexto actual resulta ser uno de los principales responsables del elevado impacto de la sociedad en el entorno, ya que según la Iniciativa para Edificios Sostenibles y Clima del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP – SBCI, por sus siglas en inglés) [3] *a nivel mundial los edificios son responsables del 40% del consumo anual de energía, siendo el sector de construcción responsable de un tercio del consumo de recursos de la humanidad, incluyendo el 12 % del consumo total de agua dulce, y produciendo hasta un 40 % de nuestros residuos sólidos*.

Se trata sin duda del principal sector en consumo energético emitiendo una tercera parte de los gases de efecto invernadero a nivel global, un 36 % para el caso europeo [4]. El potencial de ahorro estimado por UNEP – SBCI [3] está entre un 30 % y un 80 % de mejora en el consumo de los edificios empleando soluciones actualmente comercializadas, mientras que, según la UE, el ahorro total de energía a nivel europeo [5] que se podría alcanzar está en un 5 – 6 % con una reducción en las emisiones del 5 %.

En este contexto de elevados consumos de energía y recursos, principalmente originados por el transporte, el sector residencial, la industria y el sector servicios, se comenzaron a plantear iniciativas y acciones orientadas a solventar los problemas derivados de una situación deficiente en términos energéticos y de emisiones asociadas. La "Estrategia Europa 2020" [6] supuso la primera apuesta global y explicita del compromiso Europeo para buscar una solución, estrategia que más tarde ha ido ampliando la iniciativa y su ambición para los años 2030 [7] y 2050 [8].

Así, se definen tres objetivos claros como línea de acción hacia un escenario más sostenible: mejora de la eficiencia energética, reducción de gases de gases de efecto invernadero e incremento de la producción de energía proveniente de fuentes renovables.

Para el caso específico de los edificios, el documento que desarrolla esta estrategia es la Directiva de Eficiencia Energética de Edificios EPDB [9] vinculada también a la Directiva de Eficiencia Energética EED [10]. A un nivel más específico para cada uno de los sistemas y productos que componen el edificio, el Reglamento de Productos de Construcción CPR [11]

establece siete requisitos básicos entre los que se encuentra el sexto requisito de "*Ahorro de energía y aislamiento térmico"* que es aquel que determina las exigencias de aplicación a cada uno de los componentes constructivos que definen el "sistema edificio". A nivel nacional el Código Técnico de la Edificación [12] traspone estas Directivas y Reglamentos, considerando la eficiencia energética en el Documento Básico para el Ahorro de Energía, DB HE publicado en 2006. De acuerdo con el espíritu y directrices de la EPDB, este documento debe revisarse con cierta periodicidad con el fin de ofrecer documentos actualizados. Así, existen tres actualizaciones del DB HE hasta la fecha: una de 2013 [13], otra de 2017 [14] y la versión más actual de 2019 [15].

De modo generalizado, las principales directrices que se plantean desde estos documentos de distinto ámbito de aplicación, pero con el mismo objetivo común de mejora del comportamiento energético tanto de edificios nuevos como de actualización de los existentes, pueden clasificarse de acuerdo con cuatro líneas principales de acción:

- Mejora del comportamiento aislante de la envolvente frente a las condiciones exteriores.
- Mejora del rendimiento de instalaciones y equipos, principalmente los relacionados con la calefacción, refrigeración e iluminación.
- Un mayor aprovechamiento de las energías renovables a través de su incorporación en los edificios.
- Mejorar la gestión y control de la demanda energética

La forma en la que se da respuesta a estas medidas suele consistir en actuar en cada elemento del edificio de acuerdo con la línea de acción propuesta:

- Mejorar la prestación de aislamiento actuando sobre la envolvente de la fachada. Incorporando material aislante y mejorando las zonas que debilitan la capacidad aislante del conjunto como los huecos y los puentes térmicos. De esta forma se busca reducir la demanda.
- Mejorar el rendimiento de las instalaciones actualizándolas con tecnología más eficiente, como equipos modernos con mejores rendimientos y menores consumos para una misma demanda.
- Incorporar sistemas basados en fuentes renovables en aquellos edificios en los que no se cuenta con ellas y mejorar su contribución a la demanda de forma que se reduzca el consumo de energía proveniente de combustibles fósiles.
- Incluir sistemas de gestión inteligentes basados en las Tecnologías de la Información y Comunicación (TICs) de forma que se optimicen energéticamente los procesos de operación de los sistemas de climatización y de generación de ACS y de los respectivos sistemas de distribución y suministro. Esta optimización se define estableciendo la mejor combinación entre la demanda del usuario y la producción de energía, para lo que se gestionan de forma inteligente las distintas fuentes de energía, los sistemas de

almacenamiento y los equipos de producción, permitiendo en todo momento que las condiciones de confort sean las adecuadas.

La EPDB ha adoptado el concepto de Edificio de Consumo Casi Nulo - ECCN (NZEB por sus siglas en inglés), para explicitar la idea del edificio más sostenible [16]. Un concepto que pretende limitar el consumo máximo del edificio, a la vez que determina una contribución mínima de renovables, expresando ambos términos en energía primaria del edificio (kWh/$m^2$) que sirva como un patrón de referencia global.

Sin embargo, es una definición que desde que vio la luz ha venido generando cierta controversia debido a la ambigüedad en su definición [17], así como en la autonomía de los estados miembros para ajustar la cuantificación específica de los parámetros a al ámbito nacional. Frente a los 20 kwh/$m^2$ de energía primaria anual máxima establecida para Dinamarca, en Francia se ha limitado a 50 kwh/$m^2$ siendo 95 kwh/$m^2$ para el caso de Letonia [18]. Para ofrecer una orientación de las expectativas y ambición de lo que debería ser un NZEB, la Comisión ha proporcionado una serie de recomendaciones[19]. Concretamente, se han diferenciado cuatro grandes zonas climáticas en Europa (mediterránea, oceánica, continental y nórdica), se ha limitado en función de la zona, el consumo de energía primaria final máximo a 15 - 65 kWh/$m^2$ para nuevas viviendas unifamiliares y 20 -70 kWh/$m^2$ para oficinas, a la vez que se ha establecido también una contribución renovable mínima de 28-77% y 30-70% respectivamente.

Asimismo, la forma en la que se cuantifica la energía y los conceptos a tomar en consideración son también objeto de discusión, quedando, en ciertas situaciones, excluido el consumo de algún equipamiento (como la iluminación) en el caso de los NZEB [17], mientras que, en su equivalente estadounidense, el Zero Energy Building – ZEB [20], sí que se computan. Por otro lado, puede darse la paradoja de un edificio con un consumo mínimo y ninguna contribución de renovables, frente a otro con un consumo muy superior en el que se emplean una gran cantidad de energía renovable, pero que en términos absolutos que implica una demanda de energía no renovable superior a la del primer edificio.

En cualquier caso y sin entrar a valorar los aspectos técnicos de la definición y cuantificación de los NZEB, resulta de especial interés la apuesta clara que las instituciones están realizando para conseguir edificios que 1) consuman menos y 2) incorporen energía proveniente de fuentes renovables. Cabe destacar también la idea que subyace de plantear medidas integrales proponiendo soluciones que combinen varias y diferentes tecnologías, para mejorar así el rendimiento de los edificios reduciendo la demanda, mejorando el comportamiento de las instalaciones, incorporando energía renovable y mejorando la gestión global del proceso.

Si se toma en consideración la situación en Europa en donde existen 25.000 millones de $m^2$ construidos [21] el consumo medio de energía primaria en EU28 [22] fue de 173,18 kWh/$m^2$ para el sector residencial en el año 2014, y 251,39KWh/$m^2$ en edificios no residenciales en 2013, siendo para el caso español, 107,82 kWh/$m^2$ y 318,76 KWh/$m^2$ respectivamente.

En este escenario la relevancia de la rehabilitación cobra especial protagonismo, puesto que desarrollar nuevos y modernos edificios equipados con tecnologías de vanguardia contribuirá a reducir esta brecha entre el consumo actual y los NZEB. Pero no será suficiente. El principal responsable es el stock actual de edificios cuya vida útil todavía se asume que se va a prolongar varios años, si se tienen en cuenta las estimaciones para la Unión Europea, Rusia y Estados Unidos en donde se considera que el 60% de las viviendas del año 2050 ya existen hoy en día

[23], con una cifra incluso superior, un 75% [24], para el caso de un mercado inmobiliario maduro como el del Reino Unido.

Es decir, se debe dar un reemplazo de edificios obsoletos por edificios nuevos y a la vez se deben actualizar los existentes puesto que su comportamiento es todavía muy deficiente [25]. Y este último es el factor más importante ya que la situación actual del parque edificado está claramente lejos de alcanzar las metas establecidas, y se da por tanto la necesidad de adoptar de forma urgente una serie de medidas rápidas, ágiles y eficaces. El Instituto BPIE ha estimado recientemente [26] que el 97 % de los edificios de la UE deben ser renovados para alcanzar los objetivos de la descarbonización de 2050, pero únicamente un 0,4-1,2% son renovados al año. A ese ritmo, apenas alcanzará para poner a punto un tercio de los edificios.

En esta situación, la envolvente de los edificios se convierte en un elemento fundamental de la transformación puesto que es por un lado el principal responsable de las pérdidas de energía (60 – 80%) sumando cubierta, fachada y carpinterías [27][28], y por otro, porque resulta ser la frontera entre el interior, donde se consume la energía y el exterior, donde se encuentran las fuentes de energía renovables.

La iniciativa más reciente a este respecto es la denominada “European Renovation Wave” que, impulsada por la Comisión Europea, pretende duplicar en los próximos diez años la actual tasa de rehabilitación energética de edificios [29].

Por todo lo expuesto anteriormente, la oportunidad asociada al desarrollo de envolventes y fachadas orientadas a los retos establecidos para la mejora de la eficiencia energética de edificios tanto nuevos como fundamentalmente a rehabilitar, resultan ser hoy en día una realidad, explicitándose en una corriente que dirige las distintas apuestas, acciones y desarrollos de nuevos sistemas, basados en la innovación.

## 1.2. La envolvente de los edificios. Función y entidad

Una definición básica de fachada es la que proporciona el diccionario de la RAE; *“Paramento exterior de un edificio, generalmente el principal”* definición compartida por el Diccionario de Arquitectura, Construcción y Obras Públicas. Pero si se toma una definición más completa y relacionada con la construcción como la de la *“*Enciclopedia de la construcción arquitectura e ingeniería”: *“Pared exterior del cerramiento, o cierre vertical que envuelve dando privacidad al interior y sirve de protección ante los fenómenos climáticos (lluvia, nieve, calor, frío, vientos) y otros agentes para los cuales se emplean diferentes aislamientos o soluciones constructivas. La fachada debe cumplir con todas las exigencias propias de los cerramientos exteriores conforme a la normativa vigente para cada comunidad o localidad”* se llega a la conclusión, de que el principal objetivo con el que se ha venido concibiendo la fachada durante los últimos años reside principalmente en aislar un recinto o habitáculo de las condiciones exteriores y relacionadas con la climatología, para ofrecer a los usuarios dentro del edificio unas condiciones de confort debidamente controladas.

Por tanto, para conseguir ese objetivo de aislar un entorno del exterior, retomando la definición más completa, se pueden enumerar como principales objetivos relacionados con la climatología a los que hay que sumar la actividad humana.

Existe también un componente estético muy importante asociado a las fachadas estrechamente relacionado con la arquitectura y las artes, si bien resulta ser un factor muy subjetivo en cuanto a la apreciación que cada persona percibe de un diseño de fachada determinado. En cualquier caso, existen unos claros patrones estéticos vinculados al material de acabado y formas proporcionadas que pueden considerarse con un cierto grado de aceptación en cada caso de aplicación y contexto.

Las exigencias técnicas de las fachadas vienen determinadas por el Reglamento de Productos de la Construcción (RPC, o CPR Por sus siglas en inglés) [11], que es el documento que busca establecer condiciones armonizadas, iguales en toda la Unión Europea, de cara a la comercialización de productos de construcción. Para ello, establece una serie de Requisitos Básicos que toda obra de construcción debe cumplir durante un periodo de vida razonable y que son la vía para asegurar su idoneidad para el uso previsto. Así se definen requisitos para (1) Resistencia mecánica y estabilidad, (2) Seguridad en caso de incendio, (3) Higiene, salud y medio ambiente, (4) Seguridad y accesibilidad de utilización, (5) Protección contra el ruido, (6) Ahorro de energía y aislamiento térmico y (7) Utilización sostenible de los recursos naturales.

Se puede por tanto afirmar que el objetivo del RPC es establecer unos criterios de evaluación de las prestaciones del producto con el fin caracterizar los sistemas. Para ello, el reglamento define que las prestaciones en lo que respecta a las características esenciales correspondientes serán expresadas en niveles o clases, o en una descripción. Asimismo, se establece la necesidad de disponer de unos métodos europeos uniformes para comprobar el cumplimiento de los requisitos básicos, que se definirán unos métodos que recibirán el nombre de Especificaciones Técnicas Armonizadas.

De cara a valorar las prestaciones de las fachadas de acuerdo con los materiales que compone la fachada, se puede dar por hecho que los sistemas monomaterial son soluciones obsoletas frente a los sistemas multimaterial en los que se busca una adecuada combinación de materiales para aprovechar las mejores propiedades y prestaciones de cada uno de ellos cuando completan la solución de fachada. Máxime cuando una de las principales exigencias a los edificios y las fachadas es el aislamiento térmico, siendo los principales materiales de construcción de fachadas poco o nada aislantes y por el contrario los aislamientos térmicos no tienen suficientes prestaciones para cubrir el resto de las exigencias requeridas a las fachadas.

Por todo lo descrito, la forma de clasificar las fachadas es diversa y variada en función de qué criterio se emplee a modo de clasificación, como pueden ser los materiales que la componen (madera, hormigón, cerámica, acero…), sus prestaciones principales (estructural, o no portante), su modo de funcionamiento en relación a la prestación térmica (aprovechando fenómenos de convección, fachada ventilada o pasiva…) o en cuanto a su capacidad para dejar pasar la luz (opaca, translúcida, transparente…), así como la forma en la que se compone y/o fabrica (modular, industrializada, fábrica de piezas cerámicas, multicapa).

Aunque tal y como se ha comentado, hoy en día la prestación estructural no constituye el principal reto de desarrollo de la fachada, o no es al menos el único, históricamente, partiendo de cómo se comenzaron a construir los edificios, sí que tenía una relevancia fundamental puesto que era su materialización mediante muros de carga la que los hacía soportar las principales cargas del edificio, a través de las cubiertas y forjados que se apoyaban en estos muros. Posteriormente, el desarrollo de la edificación más moderna desacopló las prestaciones en dos elementos generalmente diferenciados; estructura y envolvente.

Con el fin de ofrecer una contextualización y alcance sobre el que va a discurrir la presente tesis, se plantea a continuación una clasificación atendiendo al comportamiento estructural como jerarquización preliminar que a continuación discrimina por tipo de material reflejando aquellos que se emplean de forma más generalizada. Se trata por tanto de una forma de clasificación no exhaustiva de entre otras opciones posibles, que se considera de interés para ubicar las fachadas objeto de estudio.

Así en la siguiente Tabla 1 se distingue en primer término las fachadas estructurales como aquellas que contribuyen a soportar las cargas principales del edificio de aquellas que no tienen más responsabilidad que soportar su propio peso y transferirlo. Las primeras se clasifican a continuación entre muros de carga y sistemas estructurales autoportantes mientras que las segundas entre opacas y vidriadas. El criterio último considera el material principal y/o técnica de resolución de la fachada.

| **Categoría principal** | **Subclasificación** | | | **Material / Sistema** |
|---|---|---|---|---|
| Fachadas con comportamiento Estructural | Muros de carga | | | Hormigón |
| | | | | Fábricas ladrillo y piedra |
| | | | | Madera – CLT (Cross Laminated Timber) |
| | Sistemas estructurales de fachadas autoportantes | | | Acero |
| | | | | Vidrio estructural |
| | | | | Madera (Light Timber Frame) |
| | | | | Muro cortina estructural |
| Fachadas no Estructurales | Opaca | Pesada | Industrializadas | Hormigón arquitectónico |
| | | | | Madera |
| | | | Fabrica pesada | Fábrica de ladrillo visto |
| | | | | Fábrica de ladrillo o bloque para revestir |
| | | Ligeras | Multicapa industrializada | Sistemas en acero y aluminio |
| | | | | Sistemas en madera |
| | | Mixtas | Soluciones con varias hojas resueltas in situ | Sistemas con cámara de aire: (Fachada Ventilada) |
| | | | | Aislamiento térmico por el exterior (SATE) |
| | Fachadas Vidriadas / Muro Cortina | | | Sistema Unitized (muro cortina modular) |
| | | | | Sistema Stick |

**Tabla 1. Clasificación de sistemas de fachada de acuerdo con su comportamiento estructural y otras propiedades y características representativas**

Cabe destacar que la forma en la que se resuelven las fachadas tanto a la hora de diseñarlas y construirlas puede dar lugar a una categorización u otra dependiendo de cuál sea el criterio de clasificación. Asimismo, hay en la actualidad otros materiales (composites, plásticos, textiles, fachadas vegetales…) que no se han tenido en consideración por considerar que o bien son

asimilables a alguno de los conceptos expuestos o no están alineados con el objetivo del presente estudio.

En cualquier caso, se puede concluir que existe una amplia forma de resolver las fachadas combinando materiales y sistemas a los que se les encomienda una o varias de las prestaciones esperadas de la envolvente, de acuerdo con los requisitos básicos indicados por el RPC. En algunos casos, se presentan ejemplos prácticos y detalles con los que resolver la envolvente como es el caso del catálogo de Elementos Constructivos del CTE (Código Técnico de la Edificación) en el que se pueden consultar soluciones completas y sus prestaciones atendiendo al estado de la técnica [30].

## 1.3. Incorporación de sistemas energéticos basados en renovables para conseguir edificios más sostenibles

Las recomendaciones de la Comisión Europea para la consideración de los edificios NZEB establecen claramente la relevancia que deben cobrar las renovables, indicando una contribución muy significativa de las mismas para cubrir la demanda de estos edificios de baja o nula energía [19]. Específicamente y distinguiendo las zonas climáticas establece una contribución mínima de entre 28-77% para viviendas unifamiliares, que suponen una producción neta de 25-50 total de kWh/m$^2$. En el caso de las oficinas se plantean valores más exigentes con una contribución mínima de renovables de 30-67% y una producción de 30-60 total de kWh/m$^2$.

Por otro lado, a pesar de la gran variedad de tecnologías que existen en la actualidad para captar energías provenientes de fuentes renovables y para orientar los edificios hacia la filosofía NZEB [31], su aplicación en la edificación es aún limitada debido fundamentalmente al coste, la fiabilidad en el comportamiento de los sistemas y a su rendimiento dependiente de múltiples factores. Una gran barrera la imponen las dificultades para la integración práctica dentro del edificio debido tanto al poco espacio disponible, como al grado de aceptación arquitectónica requerida bajo diferentes escenarios de trabajo, condicionados por la forma del edificio, ubicación, entorno y en general, reducida superficie disponible, así como otra serie de limitaciones que se dan debido a singularidades en cada edificio.

Asumiendo eólica, solar y geotérmica como soluciones representativas y con potencial para ser incorporadas a los edificios, excluyendo las soluciones marinas e hidroeléctricas de las comúnmente empleadas, la energía eólica y la solar son las más prometedoras actualmente, en términos de integración efectiva en los componentes constructivos. De estas dos, la solar es la que cuenta con un mayor potencial para ser integrada y empleada en diferentes aplicaciones [32]. Asimismo, el potencial de crecimiento en términos globales, no únicamente en aplicaciones residenciales, resulta mayor para los sistemas solares durante los próximos años [33], si se toma en consideración la tasa de crecimiento anual compuesto del 14,9% para el periodo 2018-2023 siendo un 6,1% para los sistemas eólicos.

Finalmente, las experiencias en integración y las eficiencias actuales contribuyen a considerar los sistemas solares como los mejor posicionados para su incorporación a los edificios a través de la envolvente. Soluciones como BISTS (Building Integrated Solar Thermal Systems), BIPV (Building Intetrated Photo Voltaics), son términos que están captando el interés del sector debido al potencial que representan.

Sin embargo, y según lo expresan diferentes autores todavía se requiere una investigación importante en diseño y fabricación de captadores, selección de materiales y revestimientos, conversión y efectividad de energía, reducción de costos, pruebas de rendimiento, control del sistema y construcción del sistema integrado.

## 1.4. La industrialización como forma de resolver la construcción moderna

De forma paralela al desarrollo de las tecnologías con las que se resuelven las fachadas, las técnicas constructivas han ido avanzando en los últimos años dando como resultado nuevos y avanzados métodos de construcción, como la industrialización[34], que permiten obtener elementos constructivos de alto valor añadido producidos de forma parcial o total fuera de la obra y que requieren de procesos de fabricación, construcción y montaje más eficientes valorando todas las etapas de una forma más global.

El concepto de industrialización de la construcción está sujeto a diversas interpretaciones en función de cómo se adapten los procesos constructivos y las soluciones de edificación al enfoque "industrial". Términos como Open Building, prefabricación, industrialización, automatización… están siendo discutidos y desarrollados en los últimos años por diversos grupos internacionales de investigación tanto desde el punto de vista arquitectónico, como es el caso del CIB W 104 Open Building Implementation [35], como desde un enfoque más orientado al proceso constructivo, como vienen analizando desde el International Group on Lean Construction [36].

Una definición aceptada es la que la describe como la suma de la Racionalización, la prefabricación y la automatización [37]. Se podría definir por tanto como el proceso productivo que, de forma racional y automatizada, emplea materiales, medios de transporte y técnicas mecanizadas en serie para obtener una mayor productividad y calidad constructiva.

En síntesis, las características básicas en una construcción industrializada son las siguientes:

- Aplicación de tecnologías avanzadas en la fabricación y ensamblaje de componentes. No implica necesariamente el uso de materiales nuevos, sino nuevas formas de aplicación o combinación de los materiales.
- Prefabricación de los componentes y elementos constructivos en instalaciones ajenas al lugar de montaje definitivo. Producción en serie de los componentes y elementos constructivos.
- Reducción e incluso eliminación de tiempos de espera y acopio en obra (concepto "just-in-time"). Racionalización y mecanización de las operaciones de montaje de los componentes en obra.
- Introducción de nuevas técnicas de gestión de la producción.

De esta forma se puede hablar de una estandarización flexible que permita una industrialización abierta para desarrollar una arquitectura industrializada, pero con personalidad y capacidad de responder de forma apropiada a una serie de requisitos y diseños arquitectónicos individuales de cada solución.

Las principales ventajas de la industrialización [38]:

- Plazo: Esta forma de fabricar supone reducir los trabajos realizados en obra (un 42% en el caso de un sistema prefabricado de hormigón [39])para maximizar los realizados en taller, mejorando los rendimientos de producción (mejora de la producción de 2,5 veces) y en términos generales reduciendo el plazo total. Esta reducción del plazo ha sido históricamente la principal motivación para adoptar este tipo de construcción.
- Coste: Si se consideran únicamente costes de adquisición de los productos, el coste de la construcción industrializada resulta, en ciertas ocasiones, sensiblemente más costoso que el de una construcción más tradicional debido, principalmente, a la falta de estandarización y reducidas tiradas de producción que justifiquen la adaptación de las técnicas de fabricación y montaje. Sin embargo, cuando se adopta esta filosofía de forma sistémica y coordinada entre todos los agentes involucrados en la construcción, se consiguen ahorros en la mayoría de los casos [40]. Un concepto claro y bien orientado ofrece un elevado potencial de replicabilidad para ser producido en masa, así como para optimizar el coste de su fabricación. El ahorro asociado a la estandarización y mayor productividad se ha cuantificado en un 10% de ahorro total del coste total de construcción [38].
- Calidad: La producción realizada en ambientes más controlados y empleando técnicas automatizadas permite un mayor aseguramiento de la calidad reduciendo, de forma muy considerable, los trabajos de repaso y deterioros de los materiales almacenados a la intemperie. Asimismo, la repetición de procesos permite optimizar la calidad de la producción obteniendo un 95% de productos sin defectos.
- Seguridad y salud: La seguridad y salud son más fáciles de controlar en una fábrica: “El sector industrial es seis veces más seguro que el de la construcción en Gran Bretaña” [41]. Por otro lado, se reduce el personal en obra, así como su exposición a los riesgos de los trabajos a la intemperie. Sin embargo, el empleo de piezas más voluminosas y pesadas supone un riesgo potencial a tener en cuenta.
- Sostenibilidad: La construcción industrializada optimiza el empleo de los materiales del edificio, reduciendo considerablemente los residuos generados. Dependiendo del tipo de construcción, la reducción en la generación de residuos se ha cuantificado en un 74-87% para el caso de sistemas de madera, un 51% para soluciones en acero y un 60% para los de hormigón prefabricado [42]. Además, esta tecnología contribuye a lograr un uso más eficiente de los recursos naturales y a minimizar la energía requerida, tanto para la fabricación de los materiales de construcción, como para el uso y mantenimiento de los edificios, minimizando el impacto medioambiental.

De forma específica, los beneficios de la industria de la prefabricación y sistemas de construcción modulares se han cuantificado para EE.UU. [43] con los siguientes resultados:

- El 66% de los proyectos confirman reducción de plazos: el 35% reducciones de 4 o más semanas.
- El 65% de los proyectos confirman reducción de presupuestos de ejecución: el 41% reducciones de más de un 6%.
- El 77% de los proyectos confirman reducción de residuos de construcción en obra; el 44% reducciones de un 54% o más.

En resumen, se puede afirmar que el concepto de construcción industrializada consiste en un trasvase de la mano de obra y los materiales desde la obra, ejecutada in situ, hacia la fábrica o talleres de ensamblaje mejorando así el control y calidad del proceso constructivo, con el objetivo último de optimizar el proceso en términos de plazo, coste, calidad, seguridad y sostenibilidad en su aceptación más amplia. Con el fin de ilustrar el concepto la Figura 1, fruto del estudio llevado a cabo por la National Audit Office del Reino Unido [44], representa este fenómeno de desplazamiento de los trabajos desde la obra hacia la fábrica.

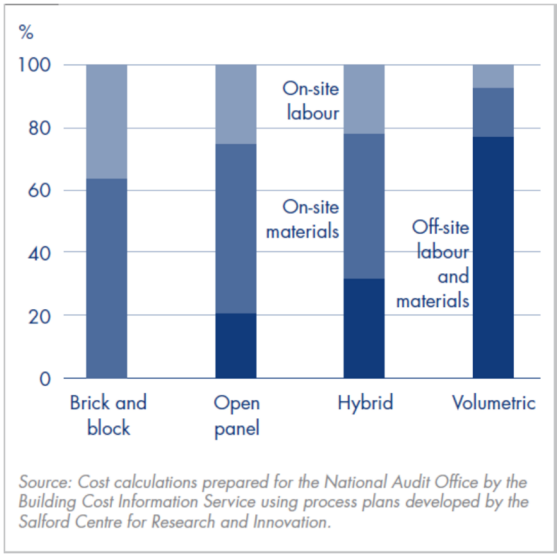



**Figura 1. Trasvase de trabajos y mano de obra desde la obra hacia la industria. [42]**

Hoy en día la gran mayoría de sistemas y materiales de construcción se han sumado a la tendencia de la industrialización, como es el caso del hormigón prefabricado para la estructura y fachadas, los sistemas multicapa con madera o acero para cerramientos y particiones, o los más completos y espectaculares sistemas de construcción modular [45] que resuelven el sistema constructivo a través de elementos volumétricos completos.

## 1.5. La oportunidad asociada a las envolventes que se "activan"

La envolvente como elemento que actúa a modo de frontera entre el ambiente interior y el exterior debe pasar de ser un elemento "pasivo" que proporciona aislamiento a ser un agente "activo" en el que además del aislamiento permita aprovechar las fuentes renovables de energía presentes en el entorno. No se trata únicamente de fortalecer la barrera térmica que se genera

en la frontera entre el interior y el exterior, reduciendo las importantes pérdidas de calor que se dan a través de la envolvente [28], sino que, además, la envolvente debe contar con la funcionalidad de captar y transferir la energía solar, permitiendo así hacer que esta fuente renovable de energía resulte cada vez más accesible y contribuyendo de forma global a obtener edificios altamente eficientes [46].

Así, parece que una oportunidad clara pasa por activarla y acelerar el proceso de integración de sistemas renovables, permitiendo que contribuya a mejorar el rendimiento de los edificios reduciendo el consumo, dotándola de una mayor inteligencia y control y, en definitiva, para mejorar el proceso de gestión global energético del edificio.

La Agencia internacional de la energía (IEA), ha identificado también la envolvente de los edificios y su necesaria transformación como una de las tecnologías clave para la transición hacia una sociedad energéticamente más sostenible [47]. De forma explícita se considera necesaria la incorporación de fuentes renovables y la capacidad de almacenamiento energético asociada a dichas tecnologías, identificando asimismo el gran potencial de estas soluciones por la gran cantidad de superficie disponible en las fachadas, frente a las limitaciones que se dan en las cubiertas de los edificios.

En este escenario las técnicas de industrialización y los productos y sistemas desarrollados bajo dicho enfoque son una clara oportunidad para introducir soluciones activas de fachada a un ritmo muy superior al actual, buscando una integración natural con el entorno construido.

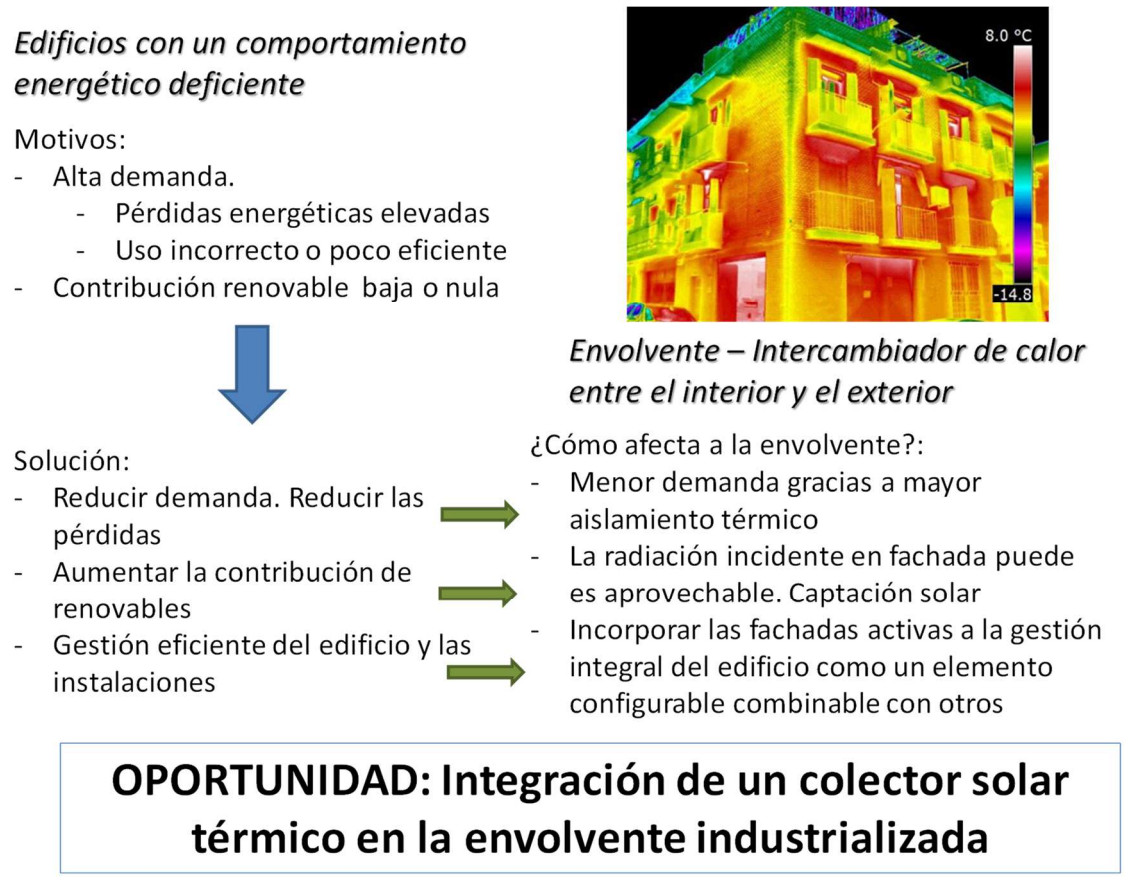



**Figura 2. Análisis de oportunidad asociada a la integración de colectores solares térmicos en la envolvente**

De acuerdo con el esquema planteado en la Figura 2, se va a presentar en el siguiente apartado el estado del arte en cuanto a soluciones de colectores solares, por un lado, sistemas industrializados de fachadas y su comportamiento térmico por otro, para finalmente plantear soluciones combinadas de fachadas y colectores solares integrales, que es el objeto principal a desarrollar en la tesis.

# 2. ESTADO DEL ARTE

## 2.1. Colectores Solares Térmicos

Los colectores solares son dispositivos destinados a captar la energía solar transformando la radiación solar en energía térmica para su posterior aprovechamiento. Las aplicaciones de menor temperatura se suelen emplear para usos domésticos para calentar el agua caliente sanitaria, calefacción e incluso refrigeración si se superan ciertos umbrales de temperatura. Por el contrario, las de mayor temperatura con sistemas de espejos concentradores y sistemas de seguimiento están destinadas a aplicaciones industriales y con mayores producciones como por ejemplo el caso de las centrales térmicas, en las que se busca una transformación de la energía térmica en eléctrica a través de turbinas impulsadas por vapor de agua.

Una clasificación habitual [48] de los colectores solares térmicos que se encuentran en aplicaciones estacionarias comprende: los colectores parabólicos compuestos, los colectores de tubos de vacío (o simplemente colectores de vacío), los colectores vidriados de placa plana (generalmente referidos como colectores planos) y los colectores no vidriados (una variación de los planos). Una clasificación en tres categorías también se refiere a los niveles de temperatura que difieren en cada caso. Las temperaturas de trabajo son significativamente más bajas para los paneles no vidriados (25-50 °C) en comparación con los colectores de planos (50-100 °C) y los colectores de vacío (100-140 °C) [49].

La adopción de una tecnología u otra también varía con la aplicación, utilizándose para usos en edificación generalmente colectores planos y de tubos de vacío mientras que, para obtener una mayor potencia con temperaturas superiores, hay una mayor variedad de sistemas como son los colectores parabólicos, fresnel, cilindros parabólicos y los campos de heliostatos como sistemas más representativos.

En cualquier caso, los colectores solares son un elemento más del sistema solar térmico en el que combinando colectores y otros componentes tecnológicos se da un proceso en el que la energía solar es captada, transferida y almacenada. La principal función del colector es, por tanto, captar la energía y, dependiendo del diseño, también podrían cubrir funcionalidades adicionales como almacenar o distribuir energía bajo un enfoque más multifuncional [50].

Esta energía es la que luego se utiliza bien para cubrir el total de la demanda de energía o de forma más generalizada como apoyo a otros sistemas de producción energéticos. Esta contribución solar permite reducir el empleo de fuentes energéticas provenientes de combustibles fósiles o de electricidad, por una fuente totalmente renovable.

El principal inconveniente es el desacople entre producción solar y consumo, por lo que el almacenamiento y la gestión cobran un singular protagonismo para aprovechar al máximo la energía captada. Así en centrales térmicas se emplean sistemas de almacenamiento basados en sales calientes y materiales de cambio de fase, mientras que para uso doméstico lo habitual es emplear soluciones basadas en agua líquida o en mezclas basadas en la misma.

Cabe destacar, asimismo, que en el amplio abanico de colectores solares existen también soluciones combinadas fotovoltaicas y térmicas que aprovechan la segunda para refrigerar la primera y no ver así mermado el rendimiento de las células solares. Por otro lado, existen aplicaciones de cierta temperatura que a través de procesos de absorción y adsorción permiten

obtener frío solar. En cualquier caso, estas tecnologías se consideran fuera del alcance de la presente tesis y no se van a analizar en detalle.

### 2.1.1 Clasificación de sistemas de colectores solares

En este apartado se va a describir brevemente las principales tecnologías de colectores solares que se emplean en edificación y por tanto se excluyen los colectores de alta temperatura como los comentados anteriormente, concentrando el análisis en sistemas de menor temperatura y que son los que habitualmente se suelen emplear en aplicaciones de edificación.

Así se pueden distinguir básicamente dos tipos de conceptos: colectores planos y colectores con tubos de vacío. Para los colectores planos, se consideran tanto los sistemas en los que el fluido calor portador es aire o líquido, como la posibilidad de que el panel cuente con un recubrimiento vidriado en su cara exterior. En cuanto a los colectores de tubos de vacío, se diferencian entre los que emplean tubos de flujo directo y los de tubos de calor ("*Heat-Pipe*" por su definición más conocida).

| **Categoría principal** | **Subclasificación** | **Sistema de Colectores** |
|---|---|---|
| Planos | No Vidriados | No vidriados por Aire |
| | | No vidriados por Agua |
| | Vidriados | Planos vidriados por Aire |
| | | Planos vidriados por Agua |
| De Vacío | | De flujo directo |
| | | De tubo de calor (*Heat-Pipe*) |

**Tabla 2. Clasificación de sistemas de colectores solares térmicos para aplicaciones en edificación**

Los colectores solares con aire son una variante de bajo coste en donde el aire se precalienta como paso previo antes de incorporarlo al sistema de ventilación. Debido al menor calor específico del aire y que generalmente no se usa un almacenamiento térmico, la eficiencia y aprovechamiento es menor que en el caso de los sistemas hidráulicos. Tomando en consideración la aplicación prevista del sistema en desarrollo en el que va a emplear una bomba de calor por agua, se van a excluir los colectores de aire y se van a considerar aquellos sistemas que, empleando un líquido, se usan habitualmente combinados con colectores solares [52]. Por tanto, la descripción presentada a continuación considera los colectores de tubos de vacío, planos y no vidriados.

- Colectores solares de tubo de vacío

Son colectores que se componen de varios tubos dispuestos en paralelo y conectados en uno de sus extremos a un conducto recolector. En el eje central de los tubos de vidrio, el absorbedor se protege con una cápsula muy bien aislada gracias al vacío generado dentro de los tubos,

reduciendo así las pérdidas por convección. A través de un tubo generalmente de cobre, se consigue calentar el fluido calor portador (diversas mezclas de agua con alcoholes y nano fluidos) que será el encargado de transferir el calor hasta el tubo recolector. Habitualmente se emplean superficies reflexivas tanto dentro del tubo como fuera con el fin de incrementar el rendimiento. Este diseño permite variar la posición del absorbedor rotándolo sobre su eje, lo que permite optimizar la orientación de este y disponer los tubos en vertical, en horizontal o en orientaciones intermedias.

Son los colectores solares de aplicación residencial que cuentan con mayor rendimiento, dadas las altas temperaturas que se alcanzan y puesto que tienen menor dependencia de las condiciones de viento y temperatura ambiental [53] gracias al aislamiento proporcionado por el vacío.

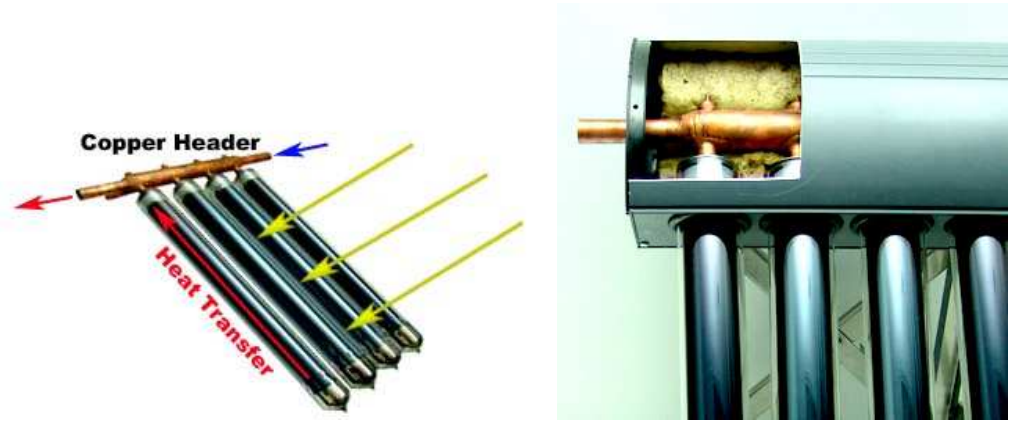



**Figura 3. Colectores solares de tubo de vacío conectados al conducto principal que transporta la energía total obtenida por el panel. [54]**

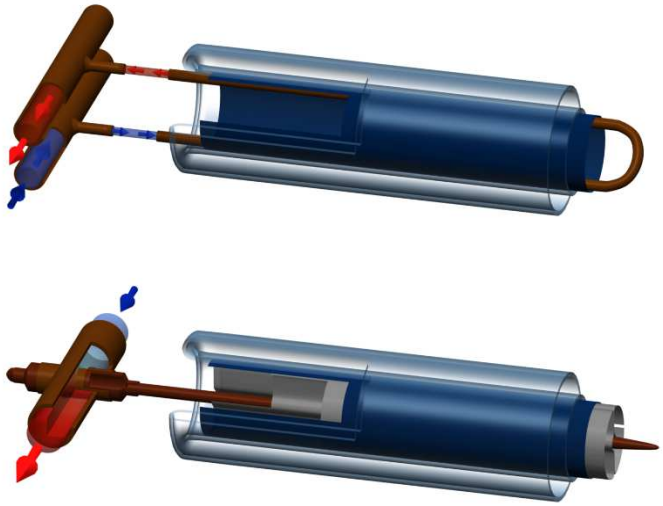


**Figura 4. Colectores solares de tubo de vacío de tipo *flujo directo* (superior) y "*Heat – Pipe*" (inferior). [55]**

La principal diferenciación que se da entre las dos tipologías adoptadas para estos colectores es la que se presenta en la Figura 4, en donde se aprecia que, en el caso de flujo directo, se requieren dos tubos colectores independientes para la impulsión y el retorno, mientras que en el caso del sistema "Heat-Pipe", únicamente se emplea un tubo por el que circula el fluido que se va calentando.

- Colectores con flujo directo: También denominados en inglés "*U shaped pipe*", en esta variante se genera un circuito con una conexión de entrada y otra de salida de forma que se dirige el flujo del fluido dentro del tubo. De esta forma el fluido se va calentando a medida que discurre por el tubo a modo de intercambiador de calor lineal.

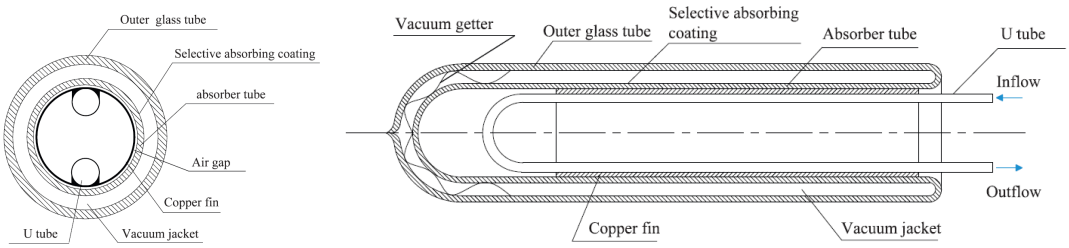



**Figura 5. Colectores de tubo de vacío solar de flujo directo. Sección principal (izquierda) y longitudinal del tubo (derecha). [56]**

- Colectores de tipo "*Heat – Pipe*": A diferencia del caso anterior, en este colector el calor se transfiere a través de un proceso cíclico de evaporación-condensación. Cuando la radiación incide en el tubo el fluido se evapora y asciende por el tubo y se concentra en la parte superior donde el calor es transferido a otro fluido en el intercambiador de calor dispuesto en la parte superior. De esta forma la temperatura del vapor disminuye condensando el fluido que vuelve a descender por gravedad hasta la parte inferior del tubo. Su eficiencia no está significativamente vinculada al ángulo de la radiación incidente por lo que se pueden emplear con diferentes orientaciones.

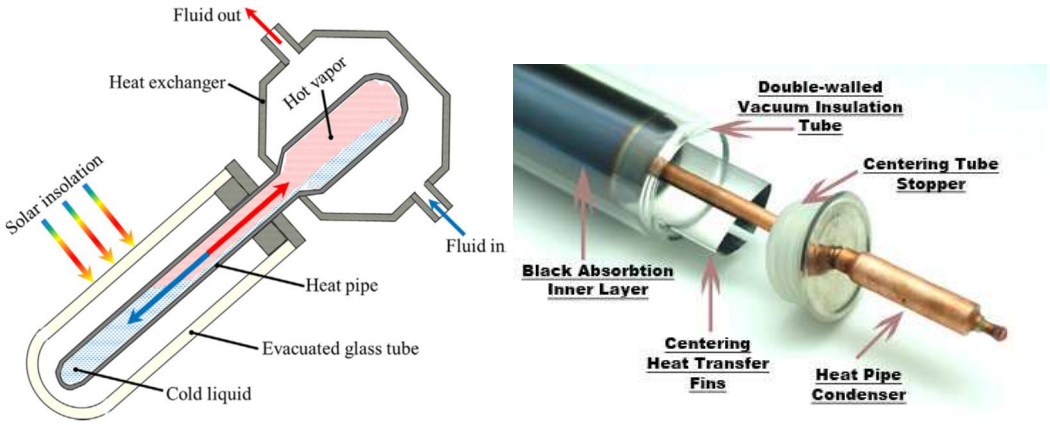



**Figura 6. Colectores de tubo de vacío tipo *"Heat Pipe"*. Principio de funcionamiento (izquierda) [57] y descripción de los principales componentes del tubo (derecha). [54]**

- Colectores solares Planos

En estos colectores se dispone del absorbedor en una superficie plana adhiriéndole un circuito hidráulico por el que discurrirá el fluido calor portador. Se dan diferentes configuraciones de circuitos en serpentín, paralelo o mixtos y habitualmente se dispone de material aislante para reducir las pérdidas de calor hacia la cara interior del colector a la vez que se consigue concentrar el calor en el perímetro del conducto. Por el contrario, las pérdidas por convección hacia la atmósfera son un aspecto característico de estos sistemas.

Compuestos de un vidrio y una cámara interior de aire estanca, funcionan aprovechando el efecto invernadero. El vidrio actúa como filtro para ciertas longitudes de onda de la luz solar dejando pasar fundamentalmente la luz visible y la mayor parte de la energía, calentando el absorbedor en la parte interior de la cámara estanca. La placa interior absorbedora está compuesta por metales y generalmente se dispone también de un recubrimiento selectivo que maximice la absorción y minimice la emisión radiante. Al calentarse la placa interior y a pesar de la baja emisividad, esta se convierte en emisora de radiación hacia el exterior para lo que el vidrio actúa como barrera a la radiación en onda larga (infrarrojos) evitando que la mayor parte de ese calor vuelva a salir del colector. De esta forma, se consigue una ganancia térmica significativa, calentando el colector y la cámara de aire por encima de la temperatura exterior.

Si bien el efecto del viento no tiene tanta importancia como en los colectores no vidriados [58], el polvo y la suciedad sí que afecta al rendimiento de los colectores solares planos [59].

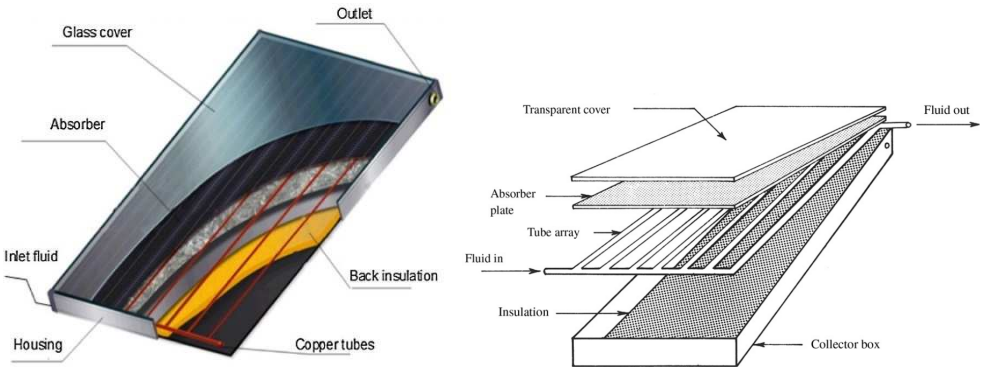



**Figura 7. Esquema general de colectores solar plano ensamblado (izquierda) [60] y descomposición por capas (derecha). [61]**

- Colectores solares planos no vidriados:

Este concepto de colector se denomina no vidriado, porque a diferencia del caso anterior no tiene un acristalamiento para atrapar el calor. Así se simplifica la solución dejando el absorbedor en la cara más exterior del panel. Generalmente de color oscuro, el absorbedor está compuesto bien por materiales poliméricos resistentes a los rayos UV o de un metal, siendo los más comunes el aluminio o el acero. El caso de los colectores poliméricos de baja conductividad ($\lambda$=0,2 W/mK) supone el de menor coste [62] mientras que los metálicos con una conductividad térmica superior (50-200 W/mK) son soluciones más similares al sistema de colector plano [63] pero en el que además de prescindir del vidrio en algunas ocasiones tampoco incorporan el aislamiento. Esto supone que las pérdidas sean mayores y el efecto del viento y la convección tengan mayor incidencia en estos sistemas, por lo que su régimen de funcionamiento se queda en niveles menores para aplicaciones de calentamiento de agua con saltos térmicos bajos o como complemento a otros sistemas de calor.

**Figura 8. Colectores solares no vidriados sin aislamiento en cubierta. Solución con material polimérico (izquierda) [64] y con acabado metálico. [65]**

La clasificación principal para distinguir los colectores solares se basa en las temperaturas de funcionamiento y tecnologías empleadas tal y como se describe en la Tabla 2. A un nivel más detallado se pueden subclasificar los sistemas también por el fluido (agua o aire) así como por el material utilizado para el absorbedor.

Pare el fluido, las aplicaciones basadas en líquidos son las más comunes, probablemente debido a la mayor densidad y al calor específico que influye en el rendimiento. Sin embargo, algunas aplicaciones interesantes con colectores solares que emplean aire (llamados también colectores transpirados) [66], [67], se utilizan en algún caso de aplicación integrada en fachadas.

Para el caso específico del presente estudio la consideración del absorbedor y su material es un área de especial interés. Así, tomando en consideración que el absorbedor es un componente clave [51] y un elemento que se fabrica habitualmente en materiales oscuros para maximizar la absorción [68], se puede plantear una subclasificación por tipo de material empleado para materializarlo. Se puede diferenciar entre materiales conductivos como metales y poco conductivos como materiales poliméricos resistentes a los rayos UV. Aunque en términos generales se emplee cobre, aluminio o acero en los sistemas de paneles vidriados y de vacío, el uso de materiales menos conductivos es poco significativo en los paneles vidriados, aunque sí que se identifican algunos ejemplos en soluciones menos vidriadas buscando desarrollar soluciones menos costosas. En la bibliografía se encuentran absorbedores con polímeros plásticos[69], [70], hormigón [71], [72] y cerámicos[73], [74] como alternativas más económicas, así como soluciones que combinen diferentes materiales [75], [76].

### 2.1.2 Comportamiento y Rendimiento de los colectores

El análisis del funcionamiento de los colectores solares se fundamenta en la ganancia energética que se obtiene con el colector. Para ello y basándose en un balance energético entre la ganancia energética y las pérdidas, la ecuación que determina la cantidad de energía útil ($Q_u$) que se puede aprovechar viene definida por la ecuación, Hottel-Whillier-Bliss [77].

$$Qu = A_C \; F_R \; [\, I_{sol} \, (\tau\alpha) - U_L \, (T_{out} - T_{amb})] \qquad (1)$$

Siendo:

$A_C$ = Superficie del colector

$F_R$ = Factor de evacuación del calor a través del fluido calorportador

$I_{sol}$ = Radiación Incidente

$\tau\alpha$ = Producto de la admitancia-absortividad

$U_l$ = Coeficiente general de pérdidas debido a conducción, convección y radiación.

$T_{out}$ = Temperatura del fluido a la salida del colector

$T_{amb}$ = Temperatura ambiente

Esta ecuación se definió en su origen para los colectores planos, de ahí que se considere el término compuesto de admitancia y absortividad. Pero también se puede emplear con ciertas modificaciones para evaluar colectores no vidriados y colectores de tubos de vacío, atendiendo a los efectos específicos de cada tecnología.

Tal y como se puede apreciar en la ecuación de $Q_u$, el potencial de absorción está directamente vinculado a los factores de admitancia y absortividad de la superficie exterior del colector. Por otro lado, las pérdidas son función de la emisividad de la superficie. La siguiente ilustración refleja el efecto de estos dos factores de ganancias y pérdidas en la cantidad máxima de energía que se puede captar con el colector debido a la radiación.

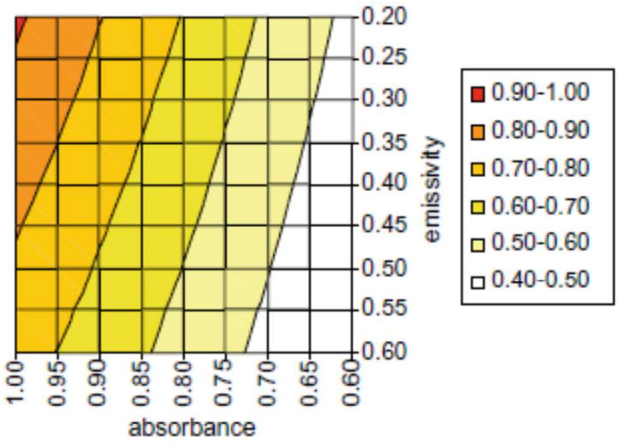



Fig. 12. Fraction of the maximal $Q_s$ (at $\alpha = 1$ and $\varepsilon = 0$) for DHW preheating from solar absorbers in a multi-family house, as a function of absorbance $\alpha$ and emissivity $\varepsilon$.

**Figura 9. Fracción de energía máxima aprovechable en función de la emisividad y la absortividad del absorbedor. [58]**

Tomando en cuenta esta energía que se aprovecha del colector y comparándola con la radiación incidente se obtiene el término de rendimiento de acuerdo con Duffie & Beckman [53].

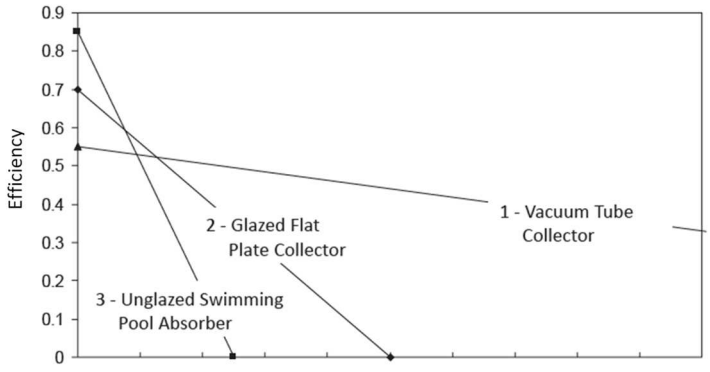
$$\eta = \frac{Q_u}{A_c\, I_{sol}} = F_R\,(\tau\alpha) - F_R\, U_L \frac{(T_{out} - T_{amb})}{I_{sol}} \qquad (2)$$

En los que los factores $F_R\,(\tau\alpha)$, *Factor de ganancia máxima del colector*, y $F_R\,U_L$, *Factor de pérdida de calor del colector*, se suelen determinar de forma experimental a través de ensayos. Al primero se le denomina *Factor de rendimiento máximo* mientras que el segundo se conoce como *Factor de pérdida de calor*.

Es importante resaltar que el factor de rendimiento está relacionado con la radiación solar como fuente principal de calor y que, por tanto, la referencia se de acuerdo con la energía solar como la principal fuente de energía aportada al sistema.

En cualquier caso, de acuerdo con el concepto de rendimiento queda contextualizado en la siguiente Figura 10 [53] en la que se aprecia las curvas características de los colectores con el rendimiento en el eje vertical, en función del término $[(T_{out} - T_{amb}) / I_{sol}]$ en abscisas, término proporcional a las temperaturas de funcionamiento e inversamente proporcional a la radiación incidente.

Esta representación permite estimar el salto térmico que se obtiene del sistema, combinado con la radiación disponible y de ahí valorar la aplicación del sistema a emplear. Así, como primera aproximación práctica en aplicaciones de baja temperatura los colectores se emplean para el calentamiento de piscinas o precalentamiento de agua. En un rango intermedio, se sitúan las aplicaciones para calefacción y agua caliente sanitaria (ACS). Finalmente, los saltos térmicos mayores permiten obtener frío solar, así como otras posibles transformaciones del calor absorbido.




| # | $F_R(\ )_e$ | $F_R\ U_L$ (W/m²ºC) | |
|---|---|---|---|
| 1 | 0.5 - 0.75 | 1 - 2 | Depends on tube spacing |
| 2 | 0.65 - 0.8 | 3 - 8 | Depends on # of covers and absorber coating |
| 3 | 0.8 - 0.95 | 10 - 20 | Depends on wind speed |

**Figura 10. Curvas de rendimiento para las principales tecnologías de colectores solares térmicos. [53]**

Cabe destacar que los rangos de temperatura indicados se refieren a valores estables de funcionamiento en los que se da una combinación apropiada de captación y consumo de la

energía, si bien, en condiciones extremas, se pueden alcanzar temperaturas pico significativamente más elevadas por lo que los sistemas deben estar convenientemente diseñados.

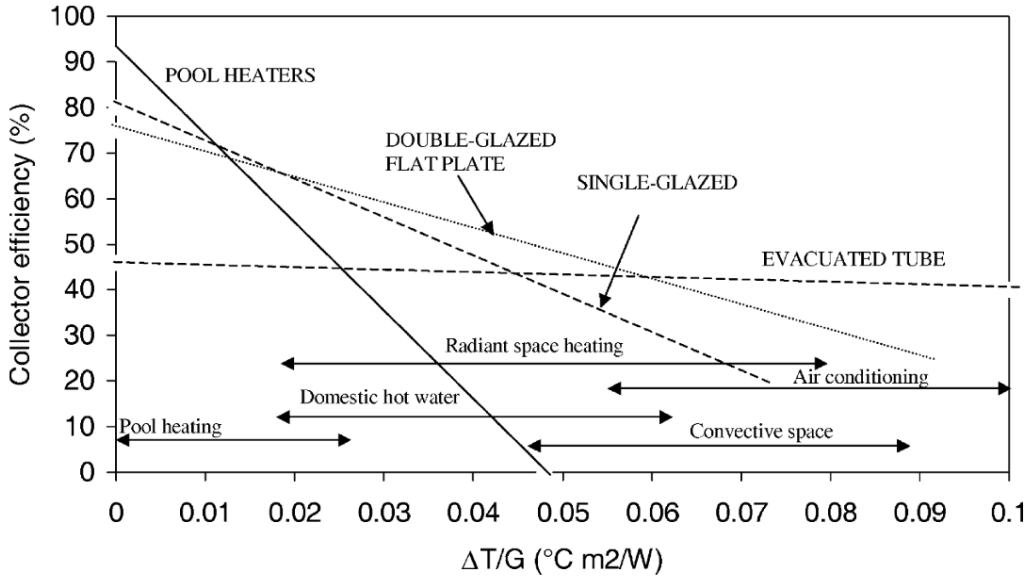



**Figura 11. Aplicaciones comunes para diferentes temperaturas y tecnologías de colectores solares térmicos [48]**

Si se tiene en consideración la radiación disponible, la forma que adoptan las curvas presentadas varía lo suficiente como para que la relación entre el sistema y la aplicación a utilizar se vea alterada en ciertos casos respecto de la clasificación anterior. La siguiente gráfica muestra este efecto cuando se toman unos límites superior e inferior de radiación de 1.000 y 200W/m$^2$ respectivamente. Así se puede apreciar la relación de proporcionalidad entre la radiación existente y el salto térmico que puede obtenerse, con un impacto directo en el rendimiento del sistema.

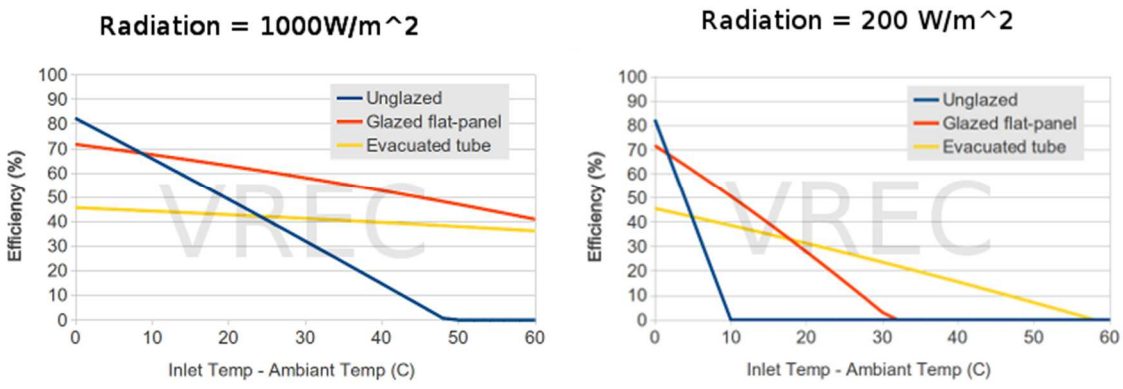



**Figura 12. Variación de las curvas de comportamiento para diferentes condiciones de radiación solar [78]**

Lógicamente, estos efectos se dan en periodos limitados en el tiempo y el análisis se debe centrar en un estudio anual, pero las variaciones son lo suficientemente significativas como para que un estudio deba tener en consideración los efectos dinámicos entre diferentes escenarios.

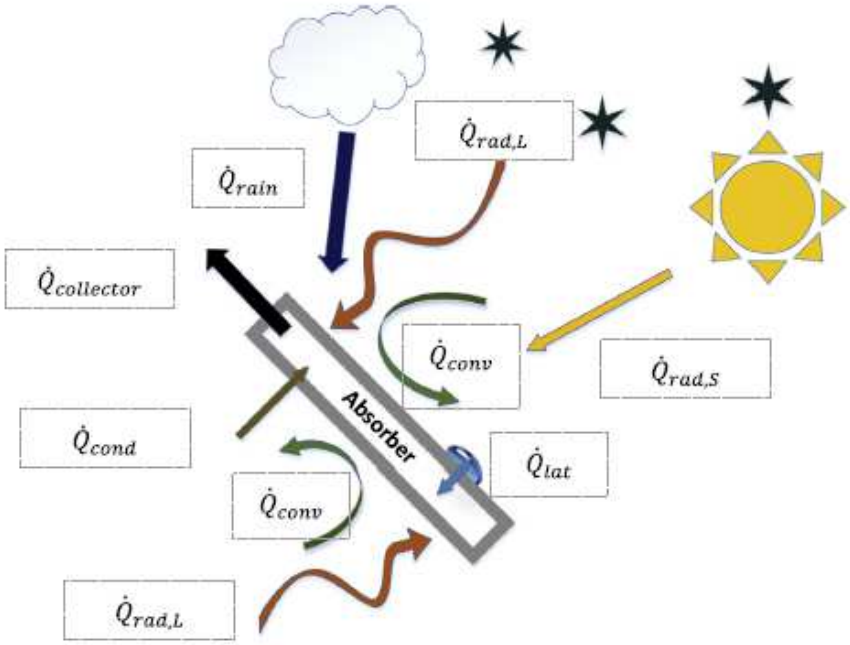



**Figura 13. Balance energético en un colector solar no vidriado sin aislamiento [79]**

Sin embargo, los fenómenos que se dan en el entorno del absorbedor van más allá y un análisis más específico delata otra serie de fenómenos de intercambio de calor tal y como se muestra en la siguiente Figura 13 para un colector no vidriado [79]. En la Figura 13 se aprecian además de los efectos de la radiación solar $Q_{rad,S}$, efectos de radiación infrarroja de la atmósfera y de otros cuerpos $Q_{rad,L}$, efectos de convección en ambas caras del panel $Q_{conv}$, conducción en la cara inferior $Q_{cond}$, calor transferido por la lluvia $Q_{rain}$ así como calor latente $Q_{lat}$ debido a cambios de fase por efectos de condensación congelación.

Existen incluso algunos efectos de refrigeración en los colectores no vidriados durante las noches, en los que se pueden conseguir temperaturas inferiores a las exteriores gracias al efecto de la radiación [80] especialmente cuando se cuenta con cielos despejados que reducen la temperatura ambiental nocturna.

Por último, cabe considerar los efectos dinámicos en ciertas circunstancias se pueden manifestar como es el caso de la inercia térmica. Este fenómeno que se da en los poco habituales colectores solares con hormigón (*Massive Solar Thermal Collectors*) supone incluir el término del almacenamiento térmico en el elemento a través del factor $Q_s$ que sumado a las ganancias $Q_i$ y pérdidas solares $Q_l$ modifica el término de calor aprovechable del colector $Q_u$ en función de si se cede o recibe calor de dicha masa [81].

$$\eta = \frac{\int Qu\, dt}{Ac \int G\, dt} \quad \text{siendo} \quad Q_u = Q_i - Q_l \pm Q_s \tag{3}$$

A modo de resumen de las principales características de los sistemas de colectores térmicos y de su aplicación, la siguiente Tabla 3 resume las principales características de los 3 sistemas considerados tomando como referencia principal la documentación aportada por Munari [49].

| | De Vacío | Vidriados | No Vidriados |
|---|---|---|---|
| Temperaturas (ºC) | 100 – 140 | 50 – 100 | 25 – 50 |
| Producción anual media (kWh/m$^2$) * | 480 – 650 | 400 – 600 | 300 – 350 |
| Coste (€/m$^2$) * | 800 | 370 | 220 |

* Valores referidos a una superficie de 6 m$^2$ de paneles solares ubicados en Suiza.

**Tabla 3. Tabla resumen de características de las tres tecnologías principales para paneles solares térmicos. [49]**

Por otro lado, existen una relación de normas de referencia que permiten caracterizar los colectores solares bajo condiciones equiparables de funcionamiento. Tal y como se describe en los siguientes puntos, todas ellas cuentan con una primera parte de requisitos generales y una segunda describiendo los métodos de ensayo:

- UNE-EN 12975-1:2006+A1:2011, Sistemas solares térmicos y componentes. Captadores solares. Parte 1: Requisitos generales. [82]
- UNE-EN ISO 9806:2020. Energía solar. Captadores solares térmicos. Métodos de ensayo. (ISO 9806:2017). [83]
- UNE-EN 12976-1:2020 Sistemas solares térmicos y sus componentes. Sistemas prefabricados. Parte 1: Requisitos generales. [84]
- UNE-EN 12976-2:2020 Sistemas solares térmicos y componentes. Sistemas prefabricados. Parte 2: Métodos de ensayo. [85]
- UNE-EN 12977-1:2019 Sistemas solares térmicos y sus componentes. Instalaciones a medida. Parte 1: Requisitos generales para los calentadores de agua solares y las instalaciones solares combinadas. [86]
- UNE-EN 12977-2:2019 Sistemas solares térmicos y sus componentes. Instalaciones a medida. Parte 2: Métodos de ensayo para los calentadores de agua solares y las instalaciones solares combinadas. [87]
- UNE-EN 12977-3:2019 Sistemas solares térmicos y sus componentes. Instalaciones a medida. Parte 3: Métodos de ensayo del rendimiento de los acumuladores de agua de calentamiento solar. [88]

### 2.1.3 Mercado global de colectores solares térmicos

En cuanto al grado de aceptación de este tipo de tecnologías se puede afirmas que a nivel mundial existe hoy en día un importante mercado con una considerable superficie de sistemas solares térmicos instalados. El programa SHC (Solar Heating & Cooling) de la Agencia Internacional de la Energía [89] lanzado en el año 1997 para promocionar el uso de la tecnología

térmica solar, viene monitorizando el progreso y evolución de los sistemas solares térmicos. De acuerdo con el último informe publicado en 2020 [90], a escala global la potencia total instalada en el año 2018 era de 483.0431 $MW_{th}$ correspondientes a 690.060.930 $m^2$ de colectores, sistemas que emplean líquido para transferir el calor en prácticamente todos los casos (99,7%), siendo el resto para sistemas basados en aire (0,3%).

Por tecnología de aplicación, la mayor parte de los sistemas instalados son colectores de tubos de vacío (70,4%), debido a la influencia de China que cuenta con la mayor cantidad de potencia instalada (70,0% del total). A mucha distancia, Estados Unidos es el segundo mayor mercado representando el 3,7% de la potencia instalada y, sin embargo, es un mercado en el que los colectores no vidriados tienen un mayor nivel de aplicación, especialmente motivado para aplicaciones de calentamiento de piscinas. Alemania, con un 2,9% de la potencia y un total de 19,84$Mm^2$ de colectores, es el país que mejor representa al continente europeo (12,7% de la potencia instalada a nivel mundial) en donde los colectores solares planos son los más empleados.

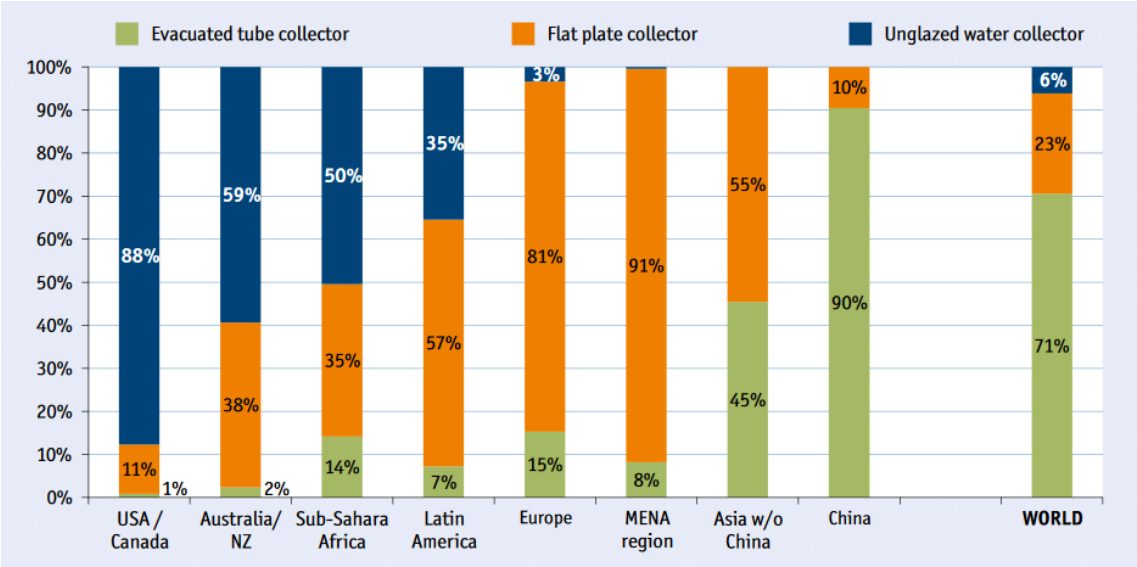



**Figura 14. Sistemas de colectores solares instalados a nivel mundial y por regiones en 2018. [90]**

En cuanto a la aplicación a la que se destinan los sistemas, la gran mayoría de aplicaciones están destinadas a cubrir la producción de ACS principalmente en edificación unifamiliar, pero con una importancia relevante en el caso de edificios de viviendas colectivas. Este esquema se da en las principales zonas a nivel mundial como son China, Europa y Asia, si bien en Oriente Medio la aplicación de residencia colectiva es más significativa que el caso de vivienda individual. Aplicaciones para calentamiento de piscinas son las más importantes en Estados Unidos, Oceanía y Sur de África, mientras que aplicaciones combinadas de calentamiento de ACS y calefacción son únicamente representativas en el mercado europeo.

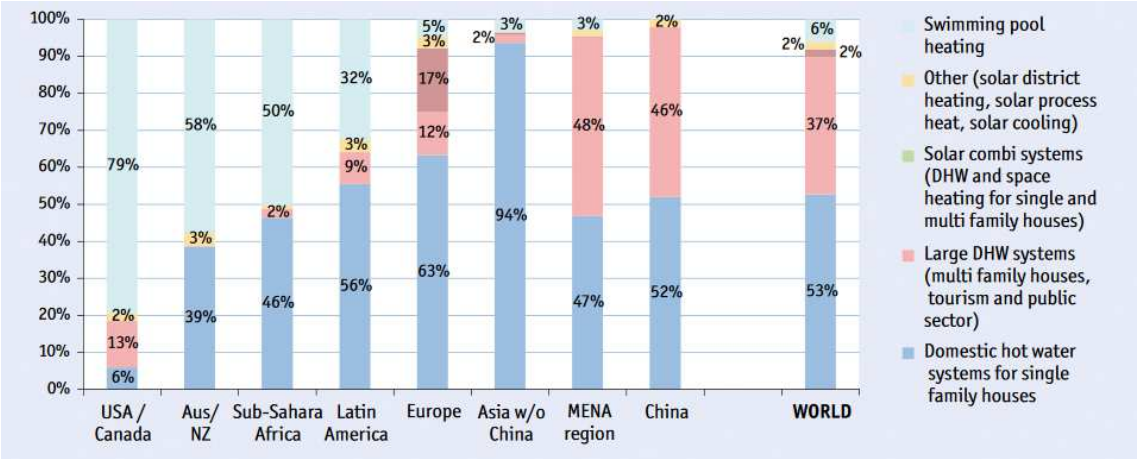



**Figura 15. Aplicaciones principales para colectores solares térmicos a nivel mundial y por regiones en 2018. [90]**

El informe del programa SHC de la IEA del que se han extraído los datos sobre el mercado de colectores es el decimoquinto de una serie de documentos que se han publicado anualmente desde el año 2005 para describir la situación a nivel mundial y por países. En cuanto a la progresión y crecimiento de los sistemas térmicos solares, el último informe indica que si bien el ritmo de crecimiento ha sido intenso en los últimos años (hasta un incremento anual del 6,7 % entre 2011 y 2012) éste está sufriendo una desaceleración. A pesar de seguir una progresión positiva, la potencia adicional instalada en 2018 fue un 6% inferior a la instalada el año anterior, debido principalmente a la desaceleración global en los mercados.

## 2.2. Soluciones constructivas para fachadas ligeras empleando acero

### 2.2.1 Clasificación de sistemas de fachada ligera en acero

Tomando en consideración el interés en sistemas de fachada multifuncionales, así como que cuenten con potencial para integrar un colector solar, en este apartado se va a hacer un repaso de aquellos conceptos para fachadas que, empleando el acero como material principal, tengan posibilidades de ofrecer una solución combinada. Para ello, se van a considerar los sistemas multicapa ligeros industrializados que emplean acero, de acuerdo con la clasificación de fachadas presentada anteriormente en la Tabla 1.

En este caso, la principal característica de los sistemas de fachada que se resuelven en acero es que presentan una relación muy competitiva entre ligereza y resistencia, a la vez que cuentan con una alta conductividad térmica, aspecto que tradicionalmente se ha asociado a la aparición de puentes térmicos, y que debían tratarse convenientemente a través de soluciones de rotura de puente térmico y combinados con aislamiento. Sin embargo, en este caso la alta conductividad y las propiedades ópticas del acero suponen una oportunidad para la aplicación como colector solar.

Con estas exigencias los sistemas en acero a considerar se pueden clasificar principalmente en tres conceptos: soluciones Light Steel Framing, sistemas de bandejas y paneles sándwich. En todos los casos se trata de sistemas que se fabrican empleando chapa de acero en fleje o bobina,

dando forma a la geometría del perfil o chapa, de poco espesor, conformándola en frío. Esta chapa conformada hará las veces de soporte resistente de la fachada autoportante. Asimismo, son soluciones que se combinan con aislamiento térmico, sistemas de fijación a la estructura principal del edificio y otros materiales de acabado para completar la fachada.

Todos los sistemas enunciados son conceptos que se pueden resolver mediante un diseño completamente industrializado, en el que se fabrica la fachada como un elemento totalmente terminado, que se monta rápidamente en obra, o puede ensamblarse in situ combinando las diferentes capas que componen el cerramiento.

- Fachadas Light Steel Framing (LSF)

El concepto de fachada resuelta con estructura ligera de acero (Light Steel Framing, o LSF por sus siglas en inglés), cuenta con una amplia tradición tanto en el Reino Unido como en Estados Unidos. Las fachadas se configuran con un entramado de perfiles verticales y horizontales de acero conformado en frío como estructura principal del panel [91]. Entre los perfiles que forman la sub - estructura de acero que conforma la fachada, se incorporan las diferentes capas de material aislante y se completa el sistema incorporando a ambos lados los acabados interior o trasdosado y exterior, o revestimiento de fachada.

La composición de las diferentes capas varía en función de los niveles de prestaciones que se pretendan satisfacer. Así, un esquema habitual es incluir aislamiento de lana mineral entre los montantes, un sistema de placa de yeso laminado hacia el interior y completar con una hoja exterior a modo de revestimiento final empleando materiales y acabados resistentes a las acciones climatológicas, como soluciones basadas en metal, cerámica, madera o vidrio.

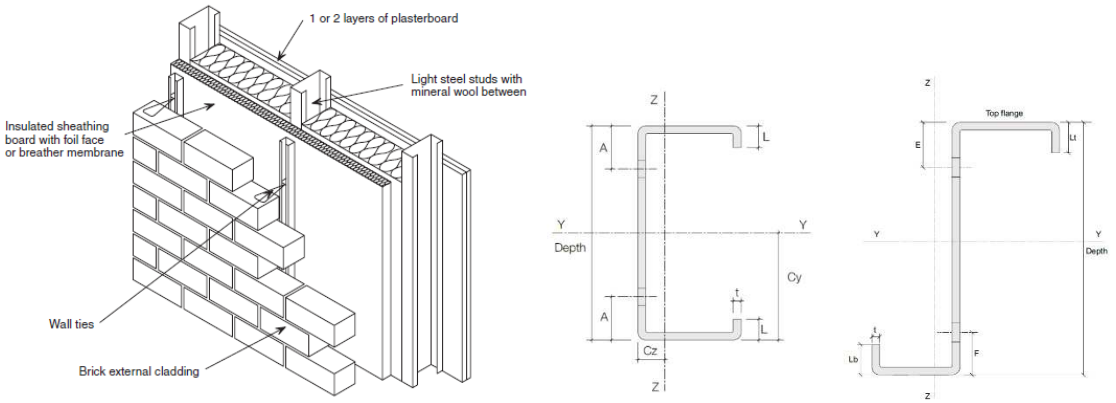



**Figura 16. Sección de Fachada resuelta con LSF [91] y perfiles en C y Z típicamente empleados. [92]**

Principalmente empleados en edificación unifamiliar o edificios de alturas limitadas a 4 ó 5 plantas, existen diferentes geometrías para el conformado en frío de los perfiles, siendo las secciones en C o Z las más comunes, en un rango de espesores entre 1 y 2mm, para un canto entre 70 y 220 mm. La disposición habitual de perfiles verticales se resuelve con una separación cada 400 – 600 mm. En caso de necesitar un refuerzo o arriostramiento, los perfiles horizontales se montan cada 1500 mm.

- Fachadas con bandejas de acero

Ampliando el concepto de la subestructura en acero del caso anterior, en este caso en vez de con perfiles aislados se resuelve el entramado con una bandeja continua plegada o conformada, sobre la que se aloja el aislamiento para completar el sistema con varias alternativas en el revestimiento exterior.

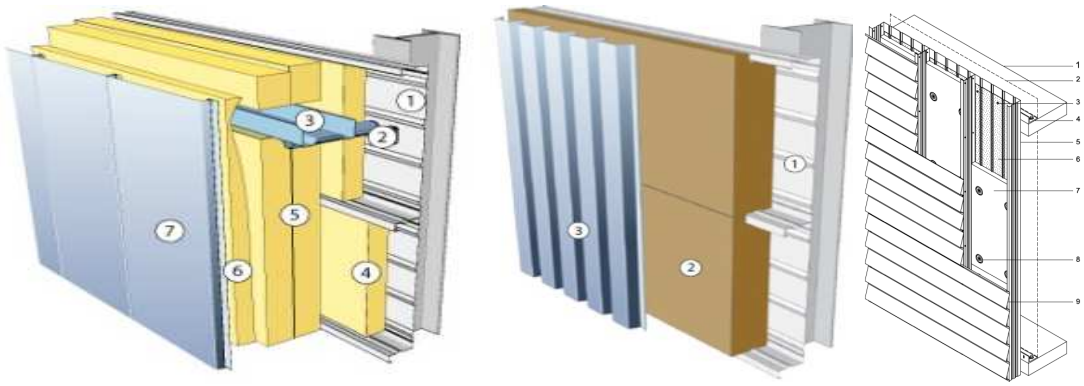


**Figura 17. Diferentes esquemas de fachada resuelta con bandeja metálica. Sistema IN221 (izquierda), 227 ST (centro) [93] y sistema Eurohábitat (derecha) [94]**

De aplicación más habitual en entornos industriales, la capa exterior se suele resolver con otra chapa de acero dispuesta de forma perpendicular al eje de la bandeja, en su variante más sencilla, para un espesor de fachada de entre 100 y 150 mm. El sistema ofrece otras alternativas cuando se incluyen mayores espesores de aislamiento y perfiles intermedios, pudiendo resolver cerramientos de hasta 450 mm. Las bandejas se fabrican empleando anchos entre 400 y 600 mm, cantos de entre 70 y 150 mm siendo espesores habituales de la chapa de 0,75 y hasta 1 mm.

- Panel sándwich

El sistema con un enfoque más industrializado y que hoy en día cuenta con un gran mercado es el denominado panel sándwich, que se compone de dos hojas exteriores metálicas y un núcleo de aislamiento, fundamentalmente de poliuretano (PUR) o poli-isocianurato (PIR).

Es un producto que ha tenido mucho éxito en el sector industrial para configurar el cerramiento de naves y edificios terciarios y especialmente para resolver la cubierta con piezas continuas de gran longitud, de hasta 15 metros, definidas en general por las posibilidades del transporte más que por limitaciones en la producción.

Existen variantes en los acabados y aislamiento pudiendo incluir otros materiales en el núcleo de aislamiento como los de lana mineral o de vidrio, así como fibras de madera. Asimismo, también hay sistemas que se resuelven con otros materiales de acabado como aluminio en vez de acero, o que combinan capa metálica y capa de madera (Figura 19 – derecha).

**Figura 18. Sistemas de panel sándwich de cara plana con acero Modular (izquierda) [95] Trimapanel flat® (centro y derecha) [96]**

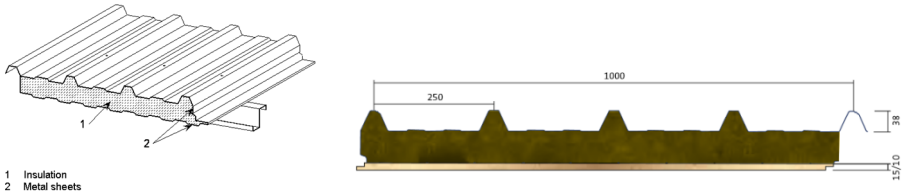



**Figura 19. Sistemas de panel sándwich grecados con ambas caras metálicas (izquierda) [97] y con cara exterior de acero y cara interior de madera (derecha) [98]**

En el caso específico del acero, los espesores de chapa habitualmente empleados en soluciones de tipo sándwich suelen estar entre 0,5 y 0,75 mm para un canto total de panel de 30-200 mm y anchos de placa de 900 a 1150 mm, siendo la longitud adaptable ya que el panel se corta a la dimensión requerida.

### 2.2.2 Comportamiento térmico de las fachadas ligeras en acero

El comportamiento de estos sistemas de fachadas con acero es una disciplina sobre la que se ha venido investigado en los últimos años, con especial focalización para el acero, en el marco del programa RFCS (Research Fund for Coal and Steel) [99] en el que se han desarrollado proyectos específicos en este ámbito: EEBIS (Energy efficient buildings through innovative systems in Steel) [100] y ETHICS (Energy and thermal improvements for construction in Steel) [101]. Al tratarse de fachadas que combinan material aislante con otro altamente conductor el interés en su comportamiento térmico ha sido objeto de diversos estudios y de forma específica el análisis de su prestación como barrera térmica ha cobrado una singular relevancia habida cuenta de las necesidades de ahorro energético [102].

De esta forma, se han planteado estudios que cuantifican los puentes térmicos que estos sistemas con tecnología LSF pueden generar, atendiendo a diversas soluciones y configuraciones. Así, a modo de ejemplo se ha cuantificado en un estudio que la influencia de la presencia del acero en el sistema y los puentes térmicos generados, pueden suponer una reducción del valor de la transmitancia térmica de un 26,2% [103], frente al valor del sistema equivalente sin acero. Asimismo, se plantean soluciones simples para reducir el efecto de los puentes térmicos como perforar estratégicamente el alma del perfil en C, actuación que puede reducir la conductividad hasta en un 47% [104]. El enfoque habitual es el de considerar una capa

equivalente [105], aproximación que también es válida para el análisis dinámico de sistemas de baja inercia como los considerados [106].

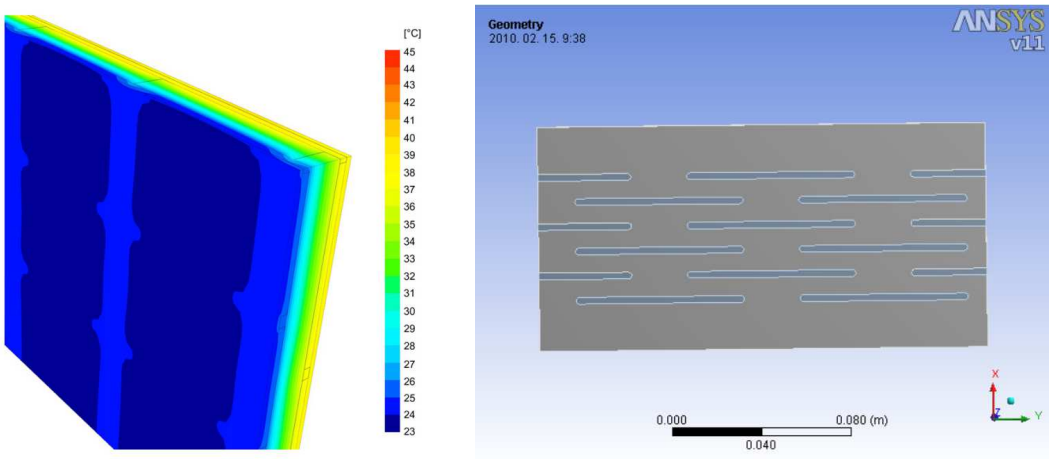



**Figura 20. Distribución de temperaturas en una fachada LSF donde se aprecian los puentes térmicos en el perímetro (izquierda) [103], detalle de perfil de acero adaptado para reducir puentes térmicos (derecha) [104] y simulación dinámica de fachada ligera de acero (derecha)**

De forma similar, en el ámbito de las fachadas ventiladas resueltas con aluminio para la subestructura y los componentes perimetrales para huecos, se ha demostrado que sustituir el material altamente conductivo como es el aluminio, por composite polimérico (hasta 2.000 veces menos conductivo), puede llegar a suponer un impacto final de un consumo energético un 13% menor al rehabilitar un edificio [107].

Para el caso de las bandejas metálicas, el enfoque planteado para soluciones LSF resulta de aplicación. En este caso existen también algunas aproximaciones tabuladas [108] que cuantifican el efecto lineal de los puentes térmicos generados por las bandejas de acero al interrumpir la continuidad del aislamiento.

Las soluciones tipo panel sándwich son probablemente las que más desarrollo tienen debido a su amplia presencia en el mercado. La norma UNE-EN 14509: 2014 define las especificaciones de los sistemas sándwich metálicos [109] recoge la forma de cuantificación de la transmitancia térmica (factor relacionado con la capacidad aislante) de los paneles, así como el efecto de los puentes térmicos de las soluciones más habituales para resolver la unión lateral entre paneles (capítulo A.10.4 de la UNE-EN 14509: 2014).

Asimismo, en el proyecto EASIE [110] financiado por el marco europeo para la investigación y el desarrollo FP7 [111], se estudiaron desarrollos para mejorar el rendimiento térmico de los paneles, así como sistemas de doble piel que se resuelven con una capa adicional adherida a la cara exterior del panel. Para el análisis dinámico habitualmente se suele proponer una analogía [112] mediante un sistema equivalente R-C (Resistencia – Condensador) empleando la analogía a través del circuito eléctrico.

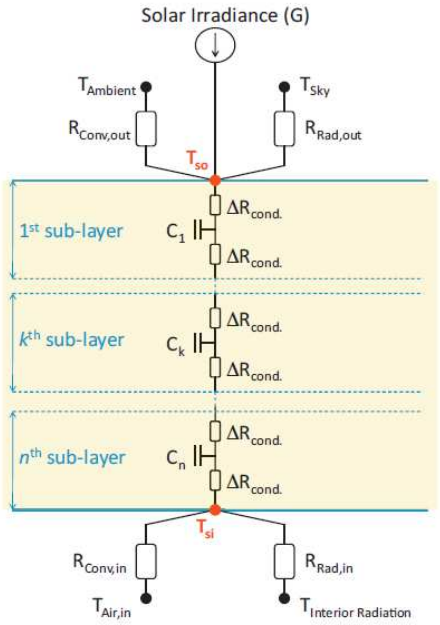



**Figura 21. Circuito análogo R/C para una cubierta horizontal resuelta con paneles sándwich. [112]**

### 2.2.3 Potencial de fachadas en acero para desarrollos en colectores integrados e industrializados

Las fachadas en acero que se han descrito tienen la ventaja de integrar aislamiento térmico y las chapas exteriores metálicas en un mismo concepto que, resulta de gran interés para alojar un desarrollo de captador solar integrado en el que se aprovechen estas dos particularidades. De esta forma, se puede explotar la capacidad de la piel de acero como absorbedor, pudiendo diseñar este elemento de forma adecuada con un acabado selectivo, a la vez que la disposición del aislamiento permitiría concentrar la mayoría del calor en zonas en las que interese, para posteriormente aprovecharlo a través de un circuito hidráulico.

Las soluciones planteadas son todas conceptos basados en chapa de acero conformada que se puede fabricar de forma lineal, plegando mediante conformado en frío bobinas, lo que resulta ser un proceso plenamente implantado a escala industrial a la vez que se presta a ofrecer grandes producciones de paneles. Si bien la anchura máxima de las piezas queda limitada por el ancho de las bobinas empleadas, la longitud del elemento apenas tiene limitaciones de longitud para las aplicaciones habituales, siendo las exigencias de transporte las que condicionan esta dimensión que se suele fijar en un máximo de 15 metros lineales. Estas limitaciones no impiden que los sistemas presentados ofrezcan una amplia flexibilidad para ofrecer sistemas de envolvente muy diversos y variados.

De los tres sistemas descritos, los paneles sándwich son los que presentan un mayor interés por el carácter altamente industrializado de la solución, lo que se entiende permite una mejor incorporación de elementos para configurar el captador integrado, como son los conductos.

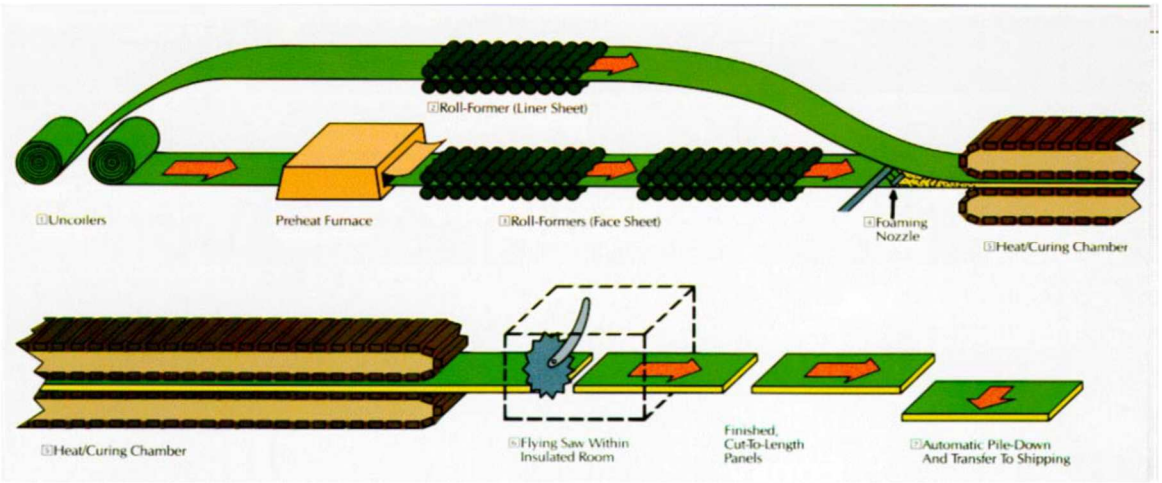



**Figura 22. Esquema de del proceso de producción en línea de paneles sándwich. [113]**

Si bien el mercado global del panel sándwich es difícil de cuantificar con precisión (se ha encontrado en la bibliografía una cuantificación de 130 $Mm^2$ fabricados en 2006 [114]), se puede afirmar que se trata de un mercado muy amplio y que esta tecnología cuenta con una buena aceptación en edificios industriales y terciarios. Sin embargo, no ha tenido tanto éxito en el sector residencial, probablemente porque su estética metálica se asocia con conceptos menos urbanos. A pesar de esto, tanto los recientes desarrollos en sistemas en fachadas ventiladas metálicas que les dan una aspecto más técnico y moderno a los edificios, unidos a los progresos en el sector metalúrgico en cuanto a acabados y soluciones de recubrimiento de altas prestaciones y aspecto más actual, suponen una clara oportunidad de estos sistemas para ofrecer soluciones adecuadas a las necesidades urgentes que tiene el parque edificado en términos de rehabilitación energética.

**Figura 23. Rehabilitación de fachada combinando panel sándwich con SATE (izquierda). Solución de paneles sándwich combinado con muro cortina (derecha). [96]**

Asimismo, la versatilidad de los sistemas sándwich para ser combinados con otras tecnologías de fachada es un aspecto a destacar, lo que permite su aplicación en obras de rehabilitación [115]. En la Figura 23 derecha se presenta a modo de ejemplo una solución de paneles sándwich combinado con un muro cortina para resolver un edificio industrial con aspecto tecnológico. A

modo de ejemplo del potencial de actuaciones en esta línea, la Empresa Municipal de Viviendas de Madrid (EMVS) ha promovido actuaciones de este tipo como es el caso del edificio del barrio Ciudad de los Ángeles (Figura 23 Izquierda), combinando paneles sándwich con sistemas aislamiento térmico por el exterior (SATE) en una obra de rehabilitación.

## 2.3. Colectores solares integrados en edificios

La combinación de fachadas y colectores solares resultan ser actualmente una solución integral muy interesante para aumentar la contribución de fuentes renovables a los edificios. Estas fachadas solares proporcionan una nueva funcionalidad a modo de colectores solares y se pueden combinar con sistemas térmicos más amplios, a través de los componentes habituales en sistemas de climatización como depósitos de almacenamiento, equipos generadores, elementos de distribución, etc.

Asimismo, la colocación de colectores en la orientación vertical de la fachada representa una menor radiación que en el montaje horizontal habitualmente, pero en algunos casos, el patrón de producción que se obtiene es más regular durante todo el año lo que implica una serie de ventajas a pesar de contar con menos radiación.

En los siguientes apartados se va a entrar a definir en mayor detalle el concepto “activo” de las fachadas, las características de su instalación en el plano vertical de la envolvente, así como la interacción de las fachadas solares con instalaciones térmicas para cubrir las necesidades de los edificios.

### 2.3.1. Fachadas solares, activas y adaptativas

La definición del comportamiento "activo" de las fachadas difiere según las fuentes consultadas. Algunos autores [81], [116] – [122], se refieren a la capacidad de capturar energía renovable (solar térmica o fotovoltaica, principalmente) a través de la fachada. Otros [123] – [127] destacan un mayor dinamismo de la solución que cuenta con elementos móviles para definir las “fachadas adaptativas”. Este segundo concepto generalmente supone una progresión sobre la respuesta activa y, además de la integración energética, combina características adicionales en cuanto a soluciones para protección solar [128] e, incluso, la incorporación de automatismos que buscan modificar y alterar la forma y apariencia externa de la envolvente de tal forma que se adapte a las condiciones cambiantes.

En línea con estos conceptos existe también el término “fachada bio-mimética”, como aquellas que buscan reproducir de alguna forma el comportamiento de la naturaleza. En este ámbito se encuentran ejemplos en los que la fachada se inspira en la piel y bello de los mamíferos para mantenerla temperatura corporal [129].

La diferenciación para fachadas opacas establecida por Quesada et al [120], considera la fachada pasiva como el elemento que absorbe y refleja la radiación incidente, frente a la activa que puede transformar esa luz solar incidente en electricidad o energía térmica. Los mismos autores incorporan la función adicional de transferir la ganancia solar directa al edificio mediante fachadas solares transparentes y translúcidas [121].

El concepto de interés para la presente tesis y la investigación y trabajos experimentales asociados, es el definido como Fachada Solar (SF – Solar Façade), Fachada Térmica Solar Activa (ASTF – Active Solar Thermal Façade), Colector Térmico Integrado de Fachada (FITC – Façade Integrated Thermal Collector) o de forma más generalizada BISTS (Building Integrated Solar Thermal Systems) [118] [130] [131]. En este caso se considera la incorporación de la tecnología del colector a la envolvente del edificio, con la doble función de actuar como una barrera que protege el interior del ambiente externo y, a la vez, de integrar un sistema que captura la energía solar en forma de calor.

Según dicha definición, las fachadas solares son otro elemento de un sistema termo-solar más amplio que combina colectores y otros componentes (almacenamiento, sistema HVAC – Heat Ventilation and Air Conditioning ...). En este sistema solar se presentan los tres procesos convencionales energéticos en los que la energía solar se captura, transfiere y almacena. Por lo tanto, la función principal del colector en fachadas solares será capturar la energía. Además, y dependiendo del diseño, también puede cubrir funcionalidades adicionales que sirven como almacenamiento o distribución de energía a través de tanques de almacenamiento o sistemas específicos bajo un enfoque más multifuncional [132].

### 2.3.2. Integración del panel en el plano vertical: La fachada

El desarrollo de un sistema integrado de fachada combinando sistemas solares y envolvente es un concepto que, si bien ha sido identificado hace ya unos años como una solución interesante, no ha tenido todavía un desarrollo suficiente para que sea empleado de una forma más extendida. A este respecto, ya se conformó un grupo de trabajo, la IEA SHC Task 41 *Solar energy and Architecture* [133], desarrollado entre 2009 y 2012, que definió un enfoque metodológico con el cual se establecían las bases para la integración arquitectónica de colectores solares y se analizaba también el rendimiento de sistemas combinados [134].

El enfoque tradicional para incorporar las renovables a los edificios se ha regido principalmente por una evaluación económica, que pretende obtener los mayores retornos de la operación. Tomando en consideración inversión y rentabilidad y asumiendo que estos sistemas son elementos independientes del edificio, que se pueden colocar en cualquier lugar, el principal y casi único requisito consiste en maximizar la eficiencia y la producción y, por lo tanto, minimizar el área de colectores para reducir el coste de la inversión. En esta situación, parece razonable elegir una orientación e inclinación óptimas (generalmente en cubierta) para así obtener el mayor rendimiento solar que justifique una inversión significativa, asumiendo que la gran mayoría de la energía solar capturada es consumida por el edificio.

Como resultado de este enfoque se diseñan sistemas que visualmente pueden identificarse fácilmente como “ajenos” a la solución arquitectónica del edificio, implican un impacto y, por lo tanto, también niveles de aceptación negativos en el entorno construido, por lo que en general, se asumen que son conceptos que no respetan la armonía del edificio, más aún cuando se plantean trabajos de rehabilitación.

Sin embargo, a pesar de que en las orientaciones sur (para el hemisferio norte) y sobre la cubierta, se pueden lograr producciones sustanciosas de energía, en algunos otros casos, incluso sin recibir el 100% de radiación, las fachadas de los edificios pueden ofrecer una oportunidad

para una inversión más asequible compartiendo los costes de implantación del sistema solar con los de la ejecución de la fachada. A cambio se obtiene una radiación acumulada algo menor, pero con una distribución de la producción solar más constante a lo largo del año, dando como resultado un sistema energético más estable y que en el transcurso del año supone también fracciones solares (energía solar obtenida frente a energía requerida) más altas.

Este es un aspecto clave para la integración de los sistemas solares en la envolvente del edificio, permitiendo un mejor uso y más inteligente de las tecnologías nuevas y futuras, proporcionando así un marco de cooperación entre los edificios y el entorno para trabajar de una forma más coordinada y armoniosa.

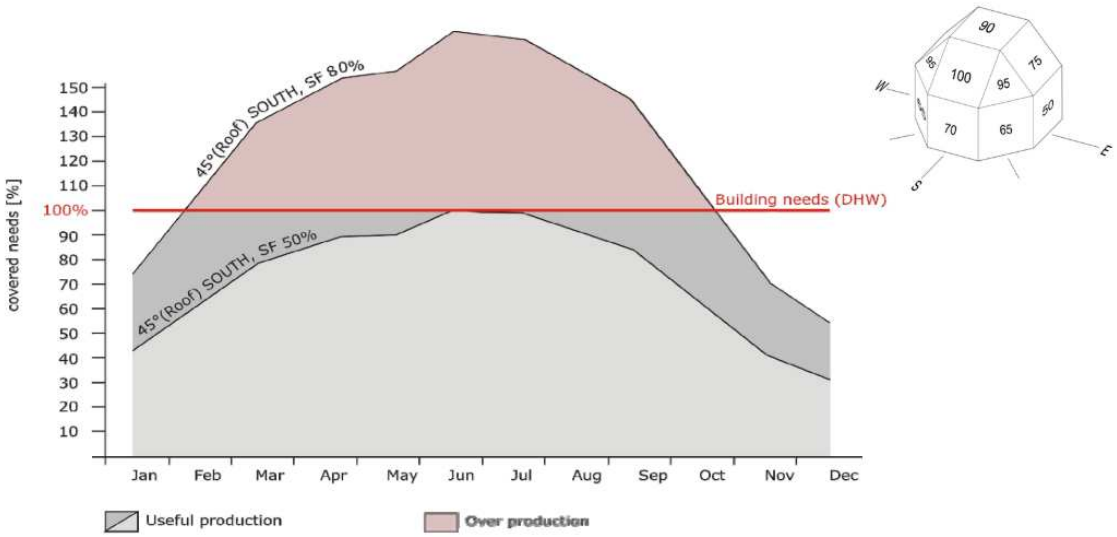



**Figura 24. Ejemplo de sobreproducción asociada a una aplicación del colector en cubierta. [134]**

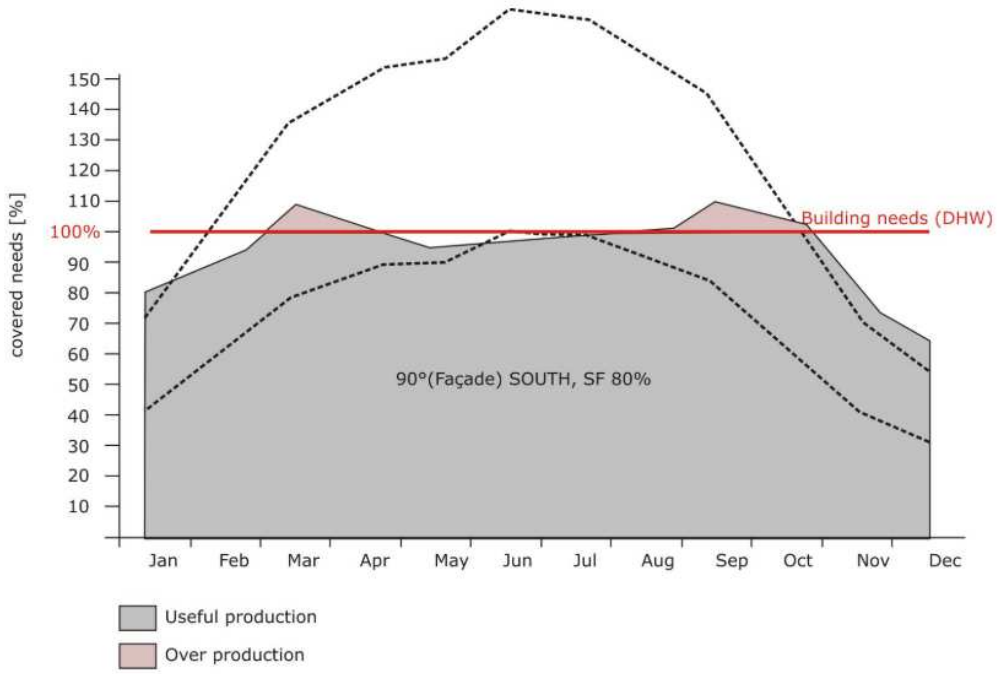



**Figura 25. Ejemplo de producción ajustada a la demanda gracias a la disposición del panel en una orientación vertical de fachada (derecha). [134]**

Tal y como se aprecia en las imágenes superiores la posición del colector es un parámetro fundamental en cuanto a la integración.

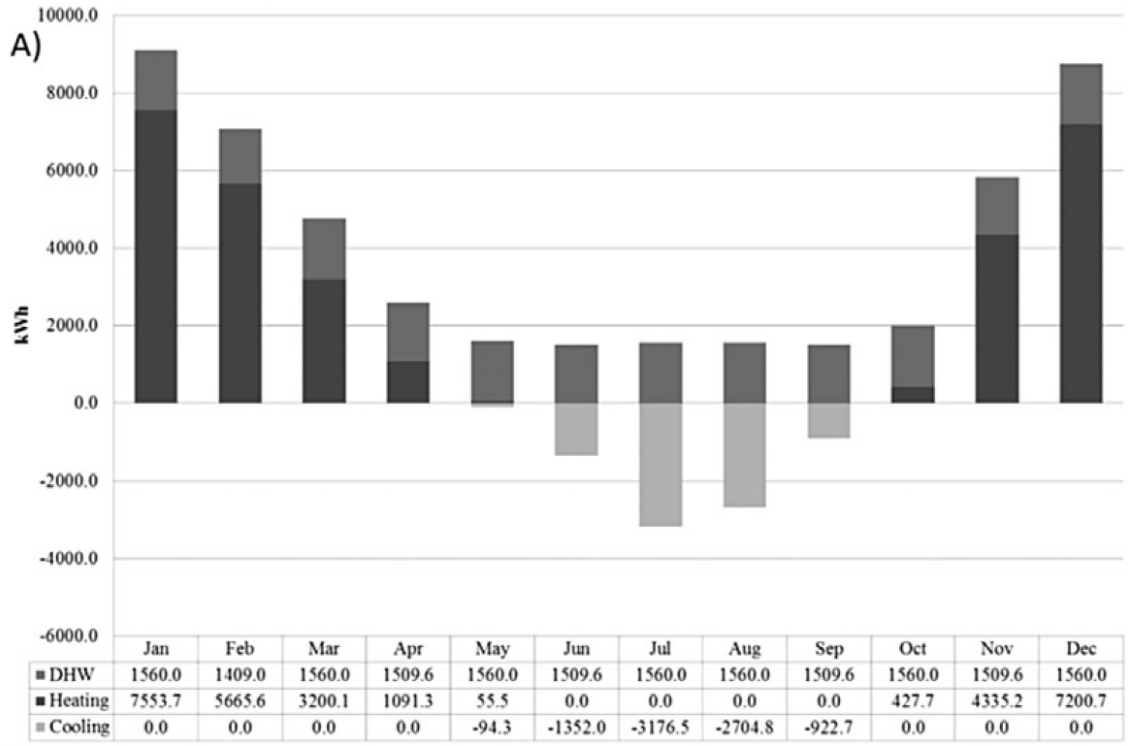
A pesar de que la posición que más radiación recibe es la cubierta, (Figura 24), con un ángulo de inclinación dependiente de la latitud asociada a la localización [135], en las fachadas se puede obtener una cantidad de radiación considerable (Figura 25). La práctica extendida de cubrir la mayor parte de la demanda en la posición que más radiación recibe supone una sobreproducción solar que implica un sobredimensionamiento del sistema para ciertas épocas del año (meses de marzo a octubre para el ejemplo de la Figura 24). Es decir, durante la mayor parte del año la energía producida es mayor que la demandada por lo que se debe gestionar esa sobreproducción. Por el contrario, un sistema instalado en fachada y orientado al sur en una latitud media de Europa, supone una radiación incidente más constante a lo largo del año (Figura 25) que puede alcanzar un resultado acumulado similar sin desaprovechamiento de la energía captada y reduciendo las diferencias extremas entre estaciones (sobrecalentamiento en verano).

De esta forma, la fracción solar (demanda del edificio cubierta por el sistema solar) se convierte en un factor determinante a la hora de valorar la integración. De nuevo en el ejemplo anterior de la Figura 24 se presentan dos casos: uno para cubrir una fracción solar del 50% y otro para el 80%. Con el primero no se dan sobreproducciones, pero la cantidad de energía aprovechada únicamente cubre la mitad de la demanda, mientras que con el segundo se obtiene una fracción mayor a costa de un exceso de energía. En una disposición de fachada orientada al sur, por el contrario (Figura 25), se consigue ese valor superior de fracción solar del 80% sin apenas sobreproducción.

Asimismo, resulta relevante destacar que los meses de mayor demanda de calor para ACS y calefacción son aquellos en los que la radiación en la cubierta es considerablemente menor y a que en los edificios con cierta altura (más de 10 metros) y geometría regular, la cantidad de superficie disponible en fachada es mayor que en la cubierta. Como consecuencia, se constata el gran interés y la ventaja que supone disponer de soluciones de colectores en fachada y que, por tanto, requieren de una mayor integración que los sistemas de cubierta en los que el impacto visual no se tiene tan en consideración. La sobreproducción que sucede al instalar en cubierta requiere, además, buscar formas de gestionar ese exceso de energía, incluso pudiendo llegar a tener que disiparla sin llegar a aprovecharla; una medida totalmente contraria a la filosofía de aprovechamiento energético de fuentes renovables.

La Figura 26 muestra un perfil típico de demanda para un edificio residencial en el que se puede apreciar que, la cantidad de energía que se debe producir para cubrir las necesidades de ACS permanece prácticamente invariable durante todo el año. La energía para calefacción se aprecia fundamentalmente durante el periodo de invierno (noviembre a abril) y de forma equivalente la generación de aire acondicionado se da durante el verano (junio a septiembre). Los meses de mayo y octubre apenas tienen demanda más allá de las necesidades fijas de ACS comentadas.

Como consecuencia, resulta necesario valorar los momentos de demanda y de producción a la hora de analizar la incorporación de las fuentes renovables a los sistemas de producción de los edificios, independientemente de si éstas se integran en la fachada o no.




| | Jan | Feb | Mar | Apr | May | Jun | Jul | Aug | Sep | Oct | Nov | Dec |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| DHW | 1560.0 | 1409.0 | 1560.0 | 1509.6 | 1560.0 | 1509.6 | 1560.0 | 1560.0 | 1509.6 | 1560.0 | 1509.6 | 1560.0 |
| Heating | 7553.7 | 5665.6 | 3200.1 | 1091.3 | 55.5 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 427.7 | 4335.2 | 7200.7 |
| Cooling | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | -94.3 | -1352.0 | -3176.5 | -2704.8 | -922.7 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

**Figura 26. Perfil de demandas típico para un edificio residencial. Edificio de 880m2 de cuatro plantas y dos pisos por planta ubicado en Milán. [136]**

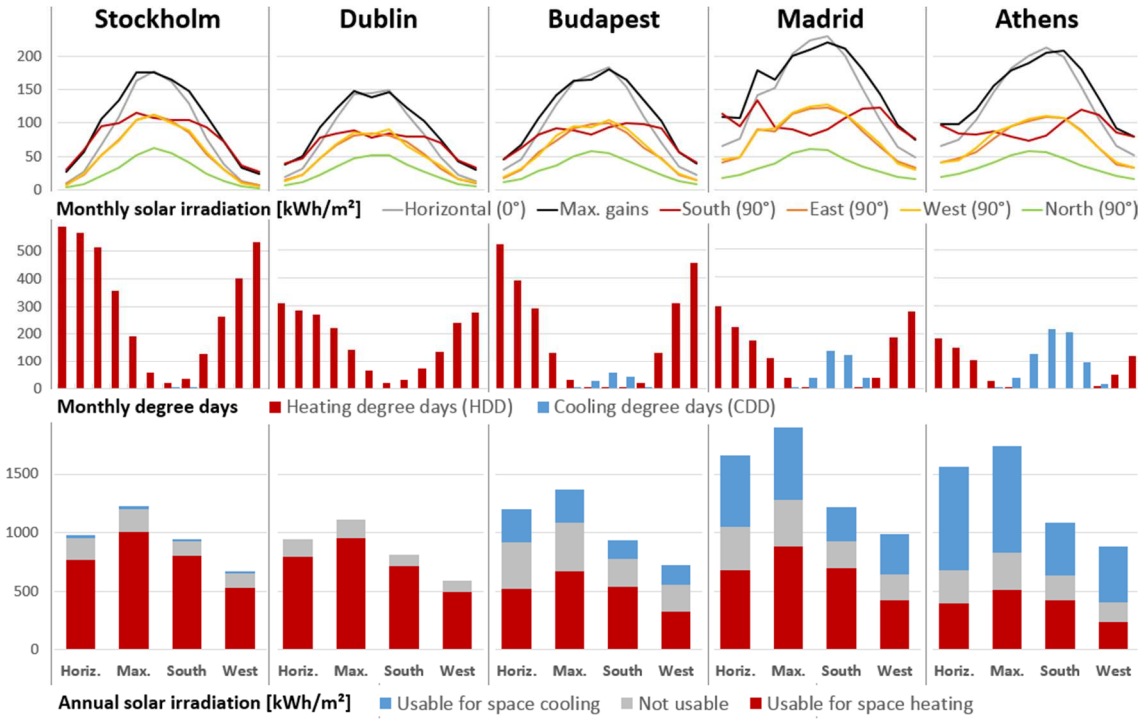



**Figura 27. Radiación global mensual sobre diferentes planos: horizontal, plano de ganancia máxima dependiendo de la ubicación, vertical sur, oeste, norte y este (línea superior). Demanda mensual acumulada de calefacción y refrigeración (línea media). Radiación aprovechable para calefacción y refrigeración, según el plano (línea inferior). [137]**

Tal y como se presenta en la Figura 27 fruto del estudio desarrollado por Elguezabal y Arregi [137], además de la radiación total disponible, es necesario considerar para qué se destina esa energía, así como el período en que la producción y el consumo se sincronizan. Como era de esperar, el predominio de la demanda de calefacción en la mayoría de los casos es claro, con demandas más intensas en latitudes del norte como Estocolmo, pero también en climas continentales severos como en Budapest. La demanda de refrigeración es insignificante para Estocolmo y Dublín y va cobrando protagonismo en latitudes más meridionales con un requisito muy pequeño para Budapest, aumenta en Madrid, siendo la demanda predominante en Atenas.

La energía no utilizable (gris en la línea inferior de la Figura 27), se relaciona con la radiación solar recibida en aquellos días en los que la demanda de calefacción o refrigeración del espacio es nula. Para los casos de Estocolmo y Dublín, esta porción es pequeña, ya que existe una demanda de calefacción incluso durante los meses con radiación máxima en verano (fila central en la Figura 27). Por el contrario, para el caso de Budapest, la demanda es bastante baja para esos meses de verano, por lo que la energía solar no se aprovecha convenientemente, lo que hace que la parte no utilizable sea más significativa. Por otro lado, en Madrid y Atenas, la energía capturada durante el verano tiene un gran potencial para ser utilizada para un posible sistema de refrigeración a través de energía solar.

Al considerar la energía solar utilizable en su máxima amplitud, Dublín presenta un resultado interesante: si bien es la ciudad con la radiación más baja (incluso por debajo de Estocolmo en una latitud más alta), la mayor parte de esta radiación es potencialmente utilizable para fines de calefacción como se describe en la Figura 27 (línea inferior).

De forma análoga a este análisis para cuatro ciudades diferentes, se ha publicado recientemente otro estudio en el que también se evalúa el potencial de generación de sistemas solares (térmicos y eléctricos) a escala global [138], considerando diferentes localizaciones y tipologías de edificios, para considerar tecnologías puedan incorporarse al diseño de edificios “cero-energía”.

### 2.3.3. Experiencias previas con sistemas de fachadas solares

Tras la introducción del concepto de fachada solar en el apartado 2.3.1 y de las ventajas de incorporar la tecnología solar en el plano de la fachada descrito en el apartado 2.3.2, en este apartado 2.3.3 se presentan las experiencias previas relevantes para sistemas de colectores solares no vidriados integrados en fachadas metálicas. Se trata por tanto de aquellos sistemas relevantes en aplicaciones no vidriadas y de baja temperatura, que se han identificado en el estado del arte presentado en este primer capítulo de la tesis, y que se consideran referencias de interés para el desarrollo de esta.

- Fachada Solabs®

Resultado de un Proyecto FP5 desarrollado entre los años 2003 y 2006, el concepto resultante consistía en un absorbedor plano de acero con un circuito hidráulico acoplado y con un alto nivel de integración en la fachada. El principal objetivo del proyecto era desarrollar un elemento multifuncional para facilitar la integración arquitectónica de los colectores (tanto en nueva

construcción como en rehabilitación) capaz de cumplir con las expectativas estéticas de los usuarios.

El sistema destinado principalmente a producción de Agua Caliente Sanitaria ofrecía una flexibilidad para conformar piezas de distintos tamaños (de longitud flexible) para resolver variantes de fachada. Se trabajaron variantes en colores y texturas con pinturas selectivas y se construyó un prototipo que fue instalado en Lausana (Figura 28).

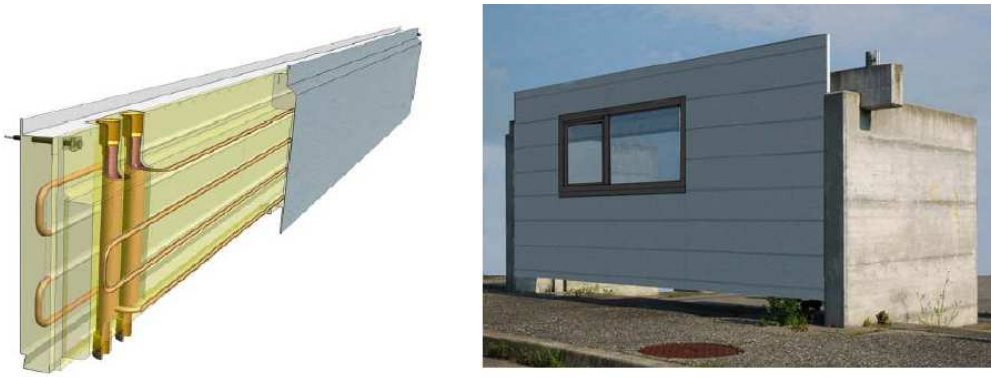


**Figura 28. Modelo y Prototipo del colector multifuncional de fachada del sistema Solabs®. [139]**

La principal ventaja de este sistema es la alta integración que se consigue en un concepto similar al de los paneles sándwich. En cuanto al nivel de flexibilidad para configurar paneles con el circuito hidráulico, al no estar la fabricación suficientemente industrializada, supone un incremento del coste a cambio de ofrecer dicha flexibilidad.

- Fachadas en aluminio fabricadas por roll-bonding

Basados en las técnicas de fabricación de los evaporadores para equipos de frío como neveras, estos conceptos han desarrollado soluciones en los que se produce el colector con los conductos integrados a través de una técnica de fabricación denominada *roll-bond*, con la que se consigue conformar completamente el intercambiador en una única placa metálica. En esta línea está la propuesta presentada por A. Giovanardi [140] así como la desarrollada por la Universidad de Graz [141]. Las ventajas de estas propuestas son las de proporcionar soluciones que permiten un mejor intercambio de calor entre el conducto y el absorbedor mediante el citado proceso de fabricación específicamente diseñado, para producir la placa del absorbedor con los conductos integrados en un componente único.

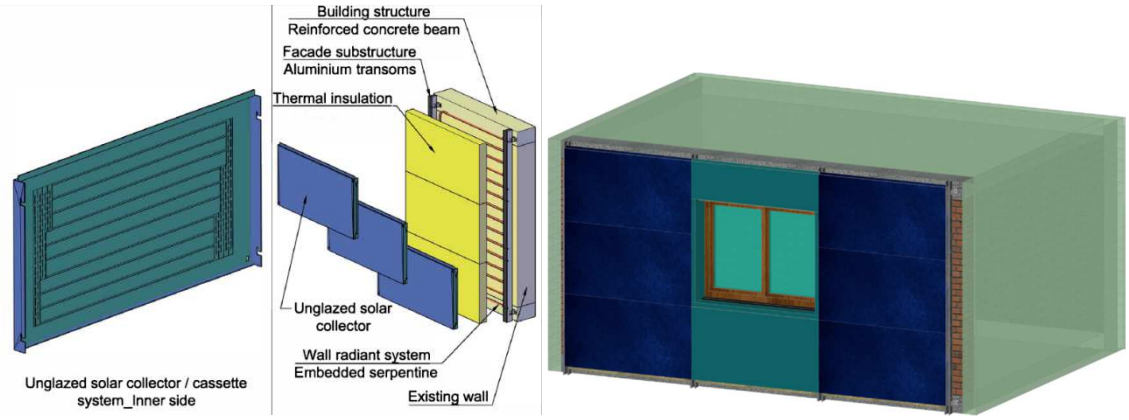



**Figura 29. Sistema de colector integrado en fachada fabricado por *roll-bonding*, compuesto por placa exterior, aislamiento y circuito radiante. [140]**

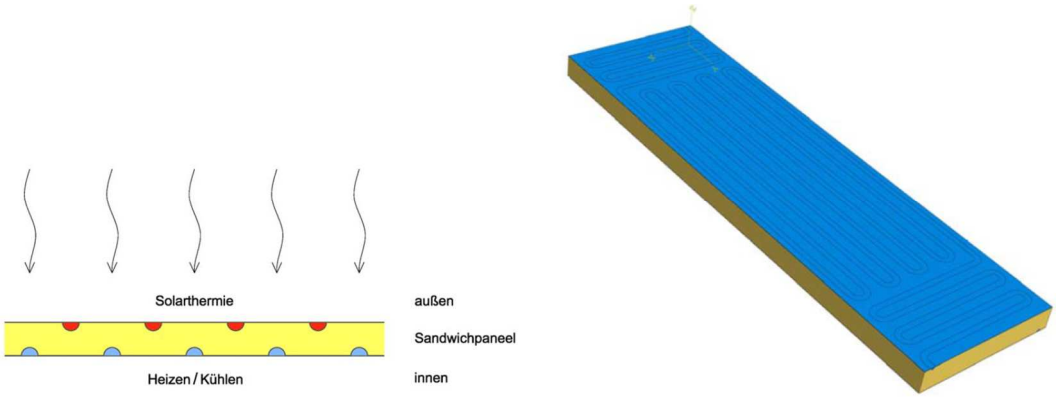



**Figura 30. Sistema de colector integrado en fachada fabricado por *roll-bonding* en el que se analiza la optimización del contacto entre conductos y absorbedor. [141]**

**Figura 31. Colectores vidriados con conductos fractales, *FracTherm*® patentada por Fraunhofer. [142]**

Además de estas propuestas y aunque se trata de una fachada vidriada, cabe destacar en esta sección el sistema Fractherm® por la singularidad de la forma en que los conductos, cuya definición está inspirada en conceptos fractales, diseño que se puede tomar en consideración para inspirar una solución no vidriada. Diseñada y patentada por el Instituto Fraunhofer es un concepto en aluminio fabricado también por *roll bonding* desarrollado en el marco del proyecto Bionicol [142]. La ventaja del esquema de conductos basado en un enfoque *bio-mimético* es el de obtener una distribución uniforme del flujo, reduciendo la presión y las pérdidas de carga y mejorando por tanto la eficiencia del sistema.

La principal ventaja de los sistemas resueltos por *roll bonding* es la fabricación totalmente industrial de la placa en un proceso muy competitivo. Además, el sistema de intercambio de calor entre absorbedor y placa está más optimizado. La flexibilidad para configurar diferentes circuitos y paneles de distinta dimensión y forma es la principal dificultad de este sistema.

- Fachada WAF

Desarrollada por la empresa austríaca WAF [143], el circuito hidráulico se inserta dentro de un aislamiento de poliuretano que está a su vez en contacto con el revestimiento metálico exterior. Se dispone de una capa adicional de lana mineral hacia el interior para completar la prestación de aislamiento térmico. Para ser utilizado con el objeto de calentar agua para piscinas, ACS o sistemas de calefacción de baja temperatura, la piel exterior se presenta con diferentes diseños como elemento plano o como lamas superpuestas y las dimensiones estándar del panel son de 2.000 x 1.200 x 50mm con un peso de 10 kg/m$^2$.

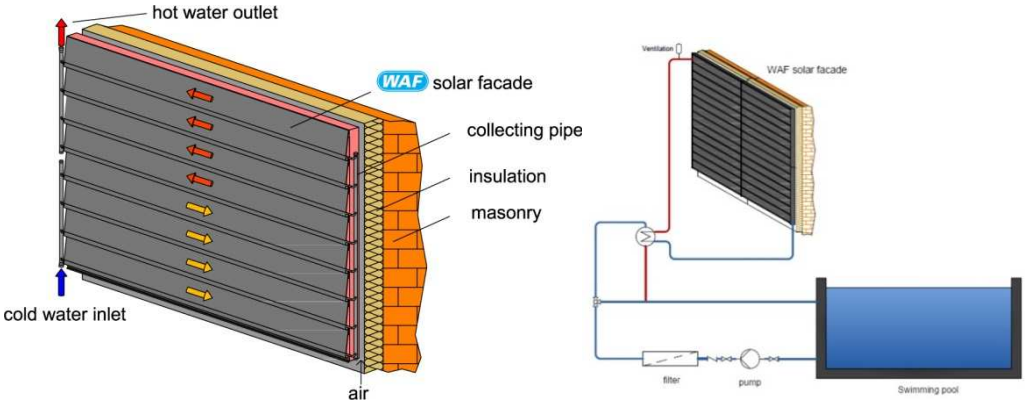



**Figura 32. Fachada WAF (izquierda) y esquema de funcionamiento para aplicación en piscinas (derecha). [143]**

La variedad de acabados y posibilidades para formar circuitos hidráulicos son las principales ventajas de una solución que, sin embargo, se resuelve de forma bastante artesanal y empleando un número significativo de materiales y componentes diferentes con los que se ensambla el conjunto.

- Sistema Triplesolar

Le empresa holandesa que comercializa estos sistemas, Triplesolar [144], ofrece una serie de soluciones principalmente para cubiertas. Se trata de paneles de aluminio que integran la función como colectores para uso residencial y terciario basados en una colección de patentes que desarrollados: WO0194852A1 [145], US6079170 [146], NL2002448C2 [147], NL2003120C2 [148]. Inicialmente concebido como colector térmico, el diseño ha evolucionado hacia una solución híbrida térmica fotovoltaica (PVT – *Photovoltaic Thermal hybrid solar collectors*).

De entre las distintas posibilidades que ofrece el sistema, la descrita en la última de las patentes listadas en el párrafo anterior (NL2003120C2) resulta de interés para el presente estudio, puesto que en dicha patente se define una solución tipo sándwich en aluminio con núcleo de

aislamiento de poliuretano, concepto alineado con la solución de fachada activa objeto de la presente tesis. La principal particularidad de dicho sistema en aluminio es la extrusión del conjunto piel exterior y conducto. También se ofrecen alternativas de colectores vidriados, así como la combinación con bombas de calor.

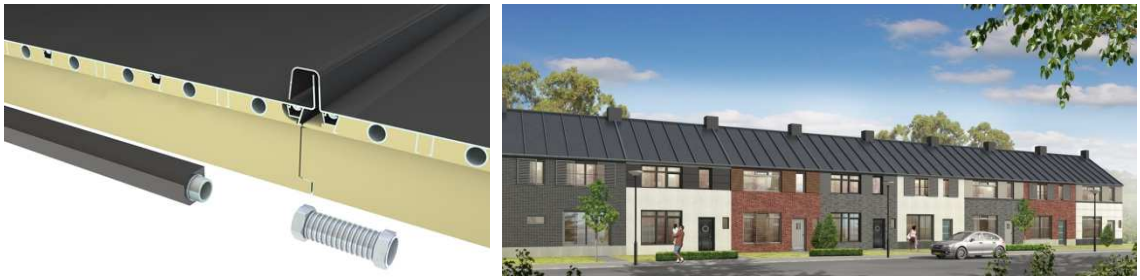


**Figura 33. Sistema Triplesolar. Detalle del sistema de conductos coextruidos junto con la chapa exterior (izquierda) y montaje de los paneles en cubierta (derecha). [144]**

La extrusión conjunta del absorbedor y los conductos son la principal ventaja de este sistema que, sin embargo, no tiene suficientemente desarrollada la superficie de contacto entre estos dos elementos para optimizar el intercambio de calor.

- Absorbedores con otros materiales

Existen otros ejemplos de sistemas de colectores solares que, en vez de aluminio y acero, consideran otros materiales para plantear soluciones de colectores no vidriados integrados en la envolvente.

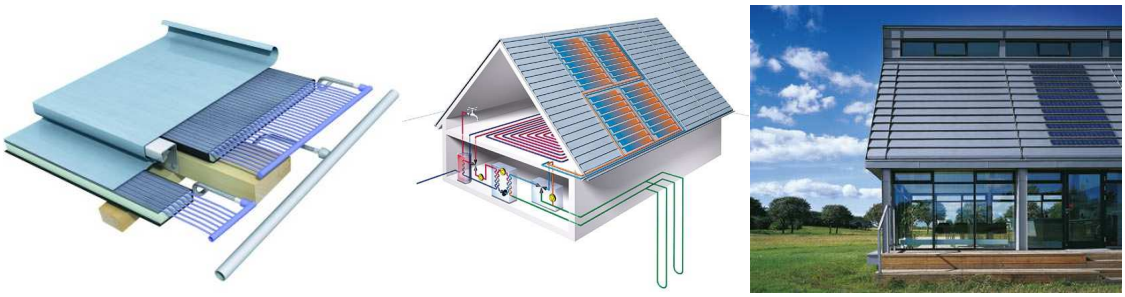


**Figura 34. Sistema Quick Step Solar Thermie de Rheinzink. Detalle de las placas y el sistema hidráulic integrado (izquierda), interacción con los sistemas del edificio (centro) e instalación en cubierta de edificio real con una variante de paneles fotovoltaica (derecha). [150], [134], [151]**

Uno de estos es el sistema Quick Step® SolarThermie [149] para cubierta y fachadas fabricado por el fabricante alemán Rheinzink, que adopta una aleación de Zinc (zinctitanio) como material para resolver tanto el absorbedor como para destacar el acabado estético del panel. Una característica interesante del sistema es que se basa en una solución de cerramiento desarrollada anteriormente (Quick Step) a la que se le incorpora esta solución activa (también cuenta con una variante PVT), de tal forma que exteriormente no se distinguen los sistemas

activos de los convencionales. Dado el interés en mantener una estética basada en el titanio, muy apreciada en el ámbito arquitectónico, los colores claros y con acabado no selectivo implican rendimientos energéticos reducidos. No obstante, el sistema demuestra el potencial de los elevados niveles de integración que se puede obtener en una solución completa suministrada por un único fabricante.

También con un metal, cobre en este caso, el Sistema TECU® Solar de la empresa KME [152] es una solución principalmente orientada a resolver cubiertas en las que se integra el colector solar. El circuito integrado tiene una forma en serpentín con una sección cuadrada de conducto, diferente de las secciones circulares o variantes, como las que predominan en los sistemas anteriores. Aunque la dimensión estándar que propone la empresa italiana que fabrica el sistema, es de 35 cm de ancho, con una longitud variable de hasta 5 metros, ofrecen la posibilidad de fabricación de tamaños a medida que se adapten a otras modulaciones. Los acabados que se ofrecen las variantes pre-oxidada y verde pre-patinada. De forma similar al Quick Step, estas texturas con colores claros implican rendimientos menores que con colores oscuros y acabados selectivos, sacrificando así la energía capturada a costa de una mayor y completa integración ofreciendo un resultado de elemento activo completamente "*camuflado*".

**Figura 35. Sistema TECU® Solar. Detalle del sistema hidráulico integrado (izquierda arriba), integración en cubierta (izquierda abajo) e integración en cubierta y fachada (derecha). [134], [152], [153]**

### 2.3.4. Integración con equipos térmicos. Bombas de calor.

La interacción entre los sistemas solares como captadores de energía y los equipos térmicos HVAC (Heat Ventilation and Air Conditioning) es una línea de desarrollo en la que se ha venido investigando e innovando en las últimas décadas. La IEA (Agencia Internacional de la Energía) apostó por esta línea de desarrollo cuando se lanzó el programa SHC (IEA – Solar Heating & Cooling Technology Collaboration Programme) [89] en el año 1977 con el objetivo de promover el uso de la energía solar a escala internacional. Desde entonces se han desarrollado 64 proyectos de investigación, 9 de los cuales están activos en la actualidad, en los que se han estudiado tanto los componentes activos, su aplicación específica en fachadas, así como la interacción entre los elementos solares y diferentes sistemas de climatización (Task 14, Task 20, Task 26, Task 37, Task 44 y Task 56, entre otros). En esta misma línea, el proyecto europeo Combisol [154] también planteaba la interacción entre los colectores solares térmicos y los

equipos de producción de agua caliente para climatización y ACS, principalmente calderas de diferentes combustibles y bombas de calor.

Esta necesidad de interacción entre los colectores solares y los sistemas de producción se ha constatado también en el análisis de soluciones que se ha presentado en el apartado 2.3.3 previo, en donde en la mayoría de los casos se proporciona, junto con la descripción de la fachada activa, una breve descripción de los componentes principales del sistema.

Como fórmula para aprovechar los sistemas de colectores de baja temperatura como los presentados para su integración en fachadas, más allá de su uso para calentar piscinas o precalentar agua, el uso de las bombas de calor como se combine con estos colectores como foco frío es una aplicación de interés para estos sistemas, debido a la sinergia que presentan ambas tecnologías.

El uso combinado para aplicaciones para ACS, calefacción y refrigeración, conectando colectores solares y bombas de calor es una fórmula que ya ha sido identificada con anterioridad. Así, la IEA desarrolló entre 2010 y 2013, el grupo de trabajo *Solar and heat pump systems* Task 44 del SHC [155] y Annex 38 del *Heat Pump Programe (HPP)* [156].

- Bombas de calor combinadas con tecnologías solares

Las bombas de calor son máquinas térmicas que tomando el calor de un foco frío (el aire, el terreno, el mar/río o un cuerpo de agua de mucho volumen), proporciona calor a mayor temperatura gracias al aporte de trabajo que se le aplica desde el exterior. Las bombas de calor se clasifican como eléctricas o térmicas, en función de si este aporte exterior proviene de una fuente eléctrica (bombas de calor eléctricas por compresión) o térmicas (bombas de calor por absorción o adsorción). De estas, la que tiene más aplicación y sobre la que se plantea el estudio de la presente tesis es la eléctrica, por lo que se va a tener en consideración dicha tecnología principalmente.

Cuando se emplean junto con colectores solares existe un cierto interés en emplear estos sistemas combinados que también tienen aplicaciones por separado, pero que de forma conjunta pueden conseguir mejoras en el rendimiento [52]. La Figura 36 cuantifica de forma gráfica la mejora teórica que se puede alcanzar en el rendimiento de la bomba, gracias al incremento de la temperatura en el lado de la fuente. Asimismo, estos sistemas se plantean como una alternativa interesante a las bombas de calor geotérmicas en las que la ejecución del pozo térmico en el terreno puede resultar muy costoso y/o técnicamente inviable.

En cualquier caso, el objetivo de estas medidas es el de mejorar el rendimiento de la bomba de calor (Coefficient Of Performance – COP) reduciendo su consumo eléctrico, gracias a una combinación con el sistema solar. Asimismo, en línea con las aplicaciones basadas en fuentes renovables, será necesaria también una cierta capacidad para almacenar la energía (mediante dispositivos de almacenamiento) entre el momento en el que se produce la radiación durante el día, para luego ser consumida durante la noche. Como consecuencia, se dota al sistema de una cierta estabilidad, similar a la que pueden ofrecer sistemas de bombas de calor geotérmicos, siempre y cuando el tamaño del tanque de almacenamiento lo permita.

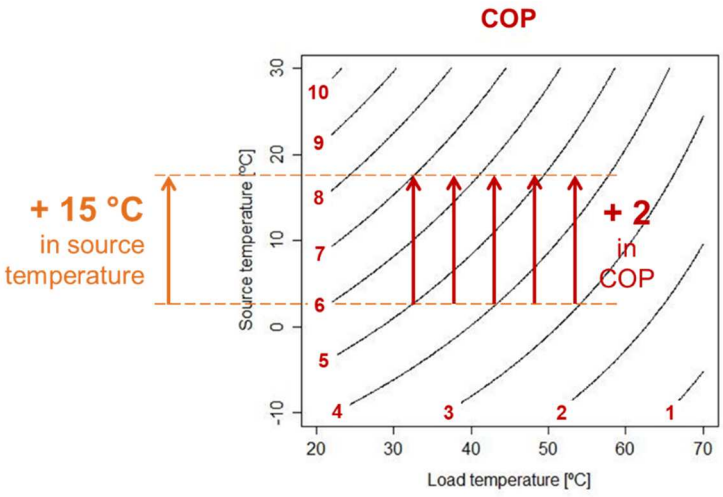



**Figura 36. Mejora teórica del COP de una bomba de calor cuando se incrementa la temperatura de la fuente para una misma temperatura en el lado de la carga.**

Por otro lado, y con el fin de ofrecer una información más específica que el COP, que describe el rendimiento en un corto periodo de tiempo, se emplea otro factor que considera periodos más extensos: el *Seasonal Performance Factor* (SPF). Este segundo es un factor estacional representativo del rendimiento de la bomba de calor durante todo el periodo (invierno o verano), para, a través de un cierto consumo eléctrico, proporcionar la cantidad de energía térmica demandada. Este es el factor (SPF) que se emplea para establecer comparativas entre sistemas equivalentes. Actualmente la Comisión Europea establece que, para bombas de calor eléctricas con un SPF mayor que 2,5, estos equipos pueden considerarse como soluciones renovables [157]. Esta consideración ha generado cierta controversia, puesto que para establecer que una tecnología soportada por energía eléctrica sea más o menos renovable, resulta necesario valorar también cómo se origina dicha electricidad y el impacto que supone dicha generación.

En cualquier caso, asumiendo que la electricidad empleada está alineada con el principio de energía más sostenible, la combinación de ambas tecnologías supone una clara oportunidad para que unos equipos, las bombas de calor, que ya de por sí pueden ser considerados como renovables, sean todavía más renovables gracias a la contribución de la tecnología solar térmica, para que el rendimiento combinado sea más favorable en términos de ahorro energético.

La combinación de bombas de calor con paneles solares se ha denominado en inglés como SAHP – *Solar Assisted Heat Pumps* [158], [159]. En estos sistemas combinados se diferencian la conexión directa o indirecta del circuito solar en función de la forma en la que se conecta éste con la bomba de calor. Cuando el panel solar actúa también como el condensador de la bomba de calor, se considera conexión directa y cuando se emplea un intercambiador de calor para transferir la energía del sistema solar a la bomba de calor, se denomina conexión indirecta. En el caso de la conexión indirecta se diferencia también la conexión en serie o en paralelo, en función de si el campo solar se conecta en el lado de la fuente (evaporador) o en el de la carga (condensador).

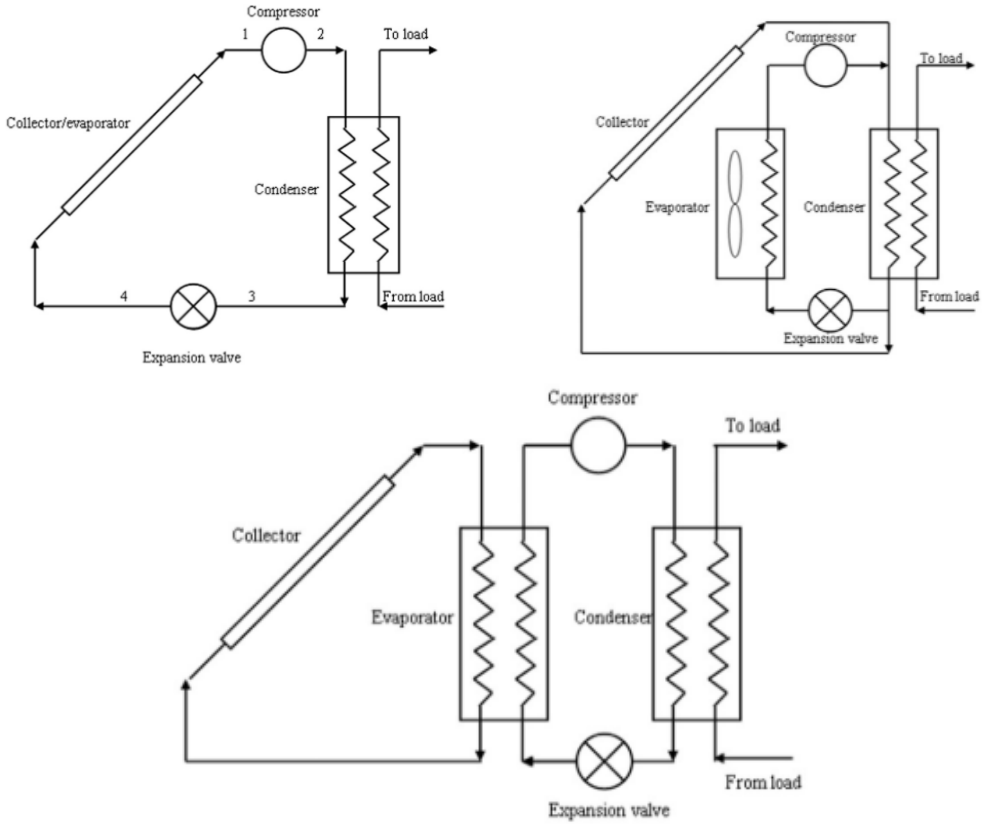



**Figura 37. Diferentes esquemas de conexión para sistemas SAHP. Conexión directa (arriba - izquierda), indirecta en paralelo (arriba - derecha) e indirecta en serie (abajo). [159]**

Finalmente, cabe destacar una de las últimas tendencias en las soluciones SHAP: la de combinar paneles PVT (fotovoltaico y térmicos) con bombas de calor [116],[160], [161]. Se trata de una evolución lógica en la que se aprovechan las dos formas energéticas que producen estos paneles: eléctrica y térmica. La primera para alimentar la bomba de calor eléctrica y la segunda para mejorar el rendimiento térmico combinado. En este campo se han dado también experiencias interesantes vinculadas a soluciones con paneles solares no vidriados en aplicaciones residenciales [162], [163].

- Bombas de calor combinadas con fachadas solares

La combinación de las bombas de calor con tecnologías de fachadas solares resulta de interés para el estudio que se plantea en la presente tesis. De forma específica, las fachadas solares de baja temperatura acopladas a bombas de calor que empleen soluciones líquido en el lado del evaporador permiten elevar las temperaturas de funcionamiento. Gracias al sistema compuesto por el colector solar junto con la bomba de calor, se alcanzan niveles más adecuados para otro tipo de usos como producción de ACS o agua caliente para calefacción, que la fachada solar por sí sola apenas puede llegar a alcanzar. A cambio, se debe aportar una cierta cantidad de energía eléctrica a la bomba de calor para que consiga ese salto de temperatura para las aplicaciones requeridas.

Esta combinación, que resulta de aplicación para cualquier tipo de colectores, tiene, además, un efecto añadido cuando se emplean colectores no vidriados: el efecto de intercambio de calor entre colector y aire exterior cuando no hay radiación. La relación entre este efecto y la combinación con las bombas de calor ya ha sido identificada anteriormente en algunos estudios [164] – [166]. Sin embargo, la forma específica de valorar este fenómeno convectivo, que únicamente resulta de interés en el caso de las soluciones no vidriadas, no parece tener un criterio de evaluación suficientemente unificado, ya a la hora de valorar el rendimiento de los colectores solares, la única fuente de calor que se considera es la aportada por la radiación solar (ecuación (2)). Como consecuencia, no se ha encontrado información suficiente en el estado del arte que cuantifique dicha contribución del colector solar al sistema fruto del efecto convectivo entre panel y ambiente exterior.

Como ejemplo de sistemas que combinan bombas de calor con colectores no vidriados, la solución para cubiertas desarrollada por Energie Solaire [167] muestra el potencial de estos sistemas mediante una conexión indirecta en serie [52]. Cuando de forma específica se emplean conexiones directas de bombas de calor y paneles no vidriados sin aislamiento actuando a la vez como panel solar y condensador de la bomba de calor, se definen también como “paneles solares termodinámicos” [168].

**Figura 38. Sistema AS de colector solar no vidriado de Energie Solaire. [167]**

Los paneles solares termodinámicos que se fabrican en aluminio empleando tecnología *roll bonding* [169], difieren del caso de Energie Solaire en que este último está fabricado con acero inoxidable y el proceso de fabricación consiste en el solapamiento de placas soldadas a modo de almohadillas.

**Figura 39. Paneles solares termodinámicos, Diseño de panel (izquierda) [168] y panel montado en cubierta (derecha). [170]**

Todos estos conceptos consideran el panel como una unidad exterior de un sistema de bomba de calor, equivalente a un concepto *Split* de aire acondicionado. Sin embargo, salvo en el caso

de Energie Solaire, es un elemento que se considera propio del sistema térmico y, por tanto, se supone ajeno a la envolvente y no se busca la integración entre panel y fachada, sin que tampoco se contemple la inclusión del aislamiento y otros elementos propios de la envolvente.

Por todo lo comentado en este apartado 2.3 sobre fachadas activas y soluciones de colectores integrados en fachada, se considera necesario desarrollar un concepto que a la vez que cuente con **un elevado nivel de integración en la fachada**, suponga una mejora de los rendimientos cuando se combina con las tecnologías de producción de calor y, de forma específica, con la tecnología de bombas de calor. De esta forma se pretende **mejorar el rendimiento tanto de la fachada activa como de la bomba de calor**.

# 3. CONCLUSIONES

El entorno construido y los edificios actuales generan un elevado impacto en el ambiente debido al consumo asociado a los mismos. La envolvente como elemento que actúa a modo de frontera entre el ambiente interior y el exterior y que, tradicionalmente ha actuado como barrera pasiva que proporciona aislamiento, debe evolucionar para comportarse como un agente "activo" con el que, además, se puedan aprovechar las fuentes renovables de energía presentes en el entorno.

Las tecnologías asociadas a los colectores solares, por un lado, y, a las fachadas industrializadas de acero, por otro, tienen un gran potencial para ser combinadas y proporcionar una fachada solar activa competitiva para los usos asociados a la producción de agua caliente (ACS y calefacción). Se propone, por tanto, desarrollar en la presente tesis un nuevo colector basado en soluciones sándwich de acero industrializadas.

Aunque se han dado una serie de experiencias en la integración de renovables y colectores, no se está consiguiendo un amplio despliegue de sistemas de este tipo en los edificios. Se han identificado algunos diseños y soluciones para integrar colectores solares de baja temperatura en la envolvente del edificio pero los beneficios que aportan no resultan tan evidentes, ni tampoco se encuentra información clara para este tipo de propuestas.

La combinación de colectores solares no vidriados y bombas de calor es una línea específica que contribuye a mejorar el rendimiento tanto del colector como de la bomba de calor. Sin embargo, el potencial de estos sistemas combinados no se conoce ni cuantifica adecuadamente con las metodologías actualmente disponibles para usos como los que se proponen, por lo que resultan necesarias demostraciones que describan las ventajas y posibilidades reales de estos conceptos.

Por tanto, se identifica una clara necesidad de ofrecer sistemas y soluciones que puedan ser integradas de forma sencilla en las envolventes de los edificios, competitivas en el mercado y con un funcionamiento y rendimiento contrastados, a través de experiencias reales de aplicación que contribuyan a potenciar la aplicación de estas tecnologías.

El objetivo principal sobre el que quiere desarrollar la tesis es el de comprender y analizar las posibilidades de las fachadas solares como una alternativa viable en el ámbito de la edificación y de la eficiencia energética. Se trata de valorar hasta qué punto estos sistemas son relevantes y pueden contribuir de forma significativa a mejorar el rendimiento energético de los edificios.

De esta forma, se va a plantear un desarrollo y análisis progresivo del concepto de fachada solar estudiado. Se va a comenzar analizando y valorando la selección de los materiales y de los componentes básicos. A continuación, se estudiará el conjunto del panel de fachada activa que integra todos esos elementos a modo de colector solar, panel que, en la siguiente fase, es el elemento que recoge la energía solar y, mediante un circuito solar, acumula la energía térmica obtenida en un depósito de almacenamiento. La siguiente fase consistirá en acoplar ese circuito solar a un sistema térmico completo con bomba de calor para producir agua caliente para consumo residencial. Para finalizar, se analizará un sistema de producción como el planteado como parte de un edificio, describiendo así un análisis combinado en el que se pueda valorar el impacto de la fachada activa en una serie de escenarios de edificación residencial alternativos.

Por todo ello la presente tesis va a contribuir a los trabajos de investigación en marcha en esta temática a través de las siguientes aportaciones principales:

1. DESARROLLO DE PRODUCTO:

- Definición y desarrollo de un concepto de sistema industrializado de fachada solar térmicamente activa. Diseño de sistema que funciona a baja temperatura, partiendo de un concepto de sistema sándwich en acero, para obtener una solución de fachada activa que integra un colector no vidriado.
- Análisis de diseños alternativos contemplando variantes a la propuesta de diseño inicial.
- Propuesta de integración en fachada, promoviendo de una forma más natural la incorporación de la energía solar térmica en el edificio. Desarrollo basado en el empleo de aquellas orientaciones de fachada que presentan mayores superficies disponibles para la generación, permitiendo así que la contribución solar se adecúe convenientemente a las necesidades del edificio.
- Combinación del colector con un equipo de bomba de calor. Esta solución permite, de manera sinérgica, mejorar el rendimiento de ambos componentes fachada y bomba de calor.

2. METODOLOGIA DE DIMENSIONAMIENTO TÉRMICO:

- Propuesta de modelo de predicción del colector y caracterización del sistema completo con especial énfasis en el colector en condiciones reales de servicio. Obtención de las curvas de rendimiento de los sistemas.
- Análisis de la repercusión del empleo de la solución desarrollada en la estimación de consumos energéticos de edificios y contribución del sistema de fachada solar, gracias a la citada caracterización de las soluciones desarrolladas.

3. PROTOTIPADO Y VALIDACIÓN EXPERIMENTAL:

- Desarrollo de campaña experimental extensa para obtener datos relevantes en cuanto al comportamiento de la fachada y del sistema acoplado a la misma en diferentes condiciones reales de funcionamiento.
- Validación experimental del modelo de predicción y del sistema completo a través de campaña experimental en condiciones reales de uso.
- Generación y procesado de datos experimentales de los diferentes componentes del sistema (fachada solar y bomba de calor), tanto acoplados como desacoplados, en condiciones de servicio reales.

# 4. REFERENCIAS


[1] Naciones Unidas. UN. (1987). Brundtland Report - Our Common Future. https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5987our-common-future.pdf

[2] Naciones Unidas. UN. (2015) Objetivos de Desarrollo Sostenible. https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/

[3] UNEP - SBCI, U. N. Iniciativa para Edificios Sostenibles y Clima del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. (2009). Buildings and Climate Change. Summary for Decision - Makers. https://europa.eu/capacity4dev/unep/document/buildings-and-climate-change-summary-decision-makers

[4] European Parliament. Fact Sheets on the European Union. Energy efficiency. http://www.europarl.europa.eu/factsheets/en/sheet/69/energy-efficiency

[5] European Commission. https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency/energy-performance-of-buildings/energy-performance-buildings-directive

[6] European Commission COM (2010). 2020. Communication from the Commission EUROPE 2020 A strategy for smart, sustainable and inclusive growth.

[7] European Commission COM (2014) 15. (2014). A policy framework for climate and energy in the period from 2020 to 2030.

[8] European Commission COM. (2011). 885. Energy Roadmap 2050.

[9] Directive 2010/31/EU. (2010). of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings.

[10] Directive 2012/27/EU. (2012). of the European Parliament and of the Council of 25 October 2012 on energy efficiency.

[11] European Parliament. Regulation (EU) No 305/2011. (2011). of the European Parliament and of the Council of 9 March 2011 laying down harmonised conditions for the marketing of construction products.

[12] Real Decreto 314/2006. (2006). de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación. https://www.codigotecnico.org/.

[13] Orden FOM /1635/2013. (2013) del 10 de septiembre por el que se actualiza el Documento Básico DB-HE (BOE 12-septiembre-2013).

[14] Orden FOM /588/2017. (2017) del 15 de junio por el que se actualiza el Documento Básico DB-HE (BOE 23 de-junio-2017).

[15] Real Decreto 732/2019. (2019) del 20 de diciembre por el que se modifica el Código Técnico de la Edificación, aprobado por el Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo (BOE 27 de-diciembre-2019).

[16] Hermelink, A., Schimschar, s., Boermans, T., Di Milano, P., Pagliano, L., Zangheri, P., Armani, R., Voss, K., Musall, E. (2012) Towards Nearly Zero-Energy Buildings Definition of Common Principles under the EPBD. Final report. Project number: BESDE10788. https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/nzeb_full_report.pdf

[17] Agostino, D. D., & Mazzarella, L. (2019). What is a Nearly zero energy building? Overview, implementation and comparison of definitions. Journal of Building Engineering, 21 (2018), 200–212. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.10.019

[18] ZEBRA2020 Project. (2016). Nearly zero-energy building strategy 2020. Contract N°: IEE/13/675.S12.675834.

[19] European Commission. Commission Recommendation (EU) 2016/1318, (2016), of 29 July 2016 on guidelines for the promotion of nearly zero-energy buildings and best practices to ensure that, by 2020, all new buildings are nearly zero-energy buildings.

[20] USDoE & NIBS. U.S. Department of Energy. The National Institute of Building Science. (2015). A Common Definition for Zero Energy Buildings.

[21] BPIE. Buildings Performance Institute. (2011). Europe. Europe's buildings under the microscope. https://ec.europa.eu/energy/en/eu-buildings-factsheets.

[22] EU Building Stock Observatory. https://ec.europa.eu/energy/en/eubuildings.

[23] IEA. International Energy Agency. (2013). Transition to Sustainable Buildings. Strategies and Opportunities to 2050.

[24] Ravetz, J. (2008). State of the stock – What do we know about existing buildings and their future prospects? Energy Policy, v.36 (12), p 4462-4470.

[25] Cao, X., Dai, X., & Liu, J. (2016). Building energy-consumption status worldwide and the state-of-the-art technologies for zero-energy buildings during the past decade. Energy and Buildings, 198–213. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.06.089

[26] Buildings Performance Institute Europe. BPIE. (2019). Future-proof buildings for all Europeans – a guide to implement the Energy Performance of Buildings Directive. http://bpie.eu/

[27] Balaras, C., Droutsa, K., Argiriou, A., & Asimakopoulos, D. (2000). Potential for energy conservation in apartment buildings. Energy and Buildings, 31, 143-154

[28] Rodríguez-Soria, B., Domínguez-Hernández, J., Pérez-Bella, J., & Del Coz-Díaz, J. (2015). Quantitative analysis of the divergence in energy losses allowed through building envelopes. Renewable and Sustainable Energy Reviews. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.05.002

[29] European Commision. (2020). European Renovation Wave. https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/renovation-wave_en

[30] Catalogo elementos constructivos. CTE. 2011. https://www.codigotecnico.org/index.php/menu-catalogo-informatico-elementos-constructivos.html

[31] Belussi, L., Barozzi, B., Bellazzi, A., Danza, L., Devitofrancesco, A., Fanciulli, C., … Scrosati, C. (2019). A review of performance of zero energy buildings and energy efficiency solutions. Journal of Building Engineering, 25(April), 100772. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100772

[32] Vourdoubas, J. (2018). Use of Renewable Energy Technologies in Buildings. Civil Engineering Research Journal, 6(4), 102–104. https://doi.org/10.19080/CERJ.2018.06.555693

[33] Tribhuvan Pratap, S. (2019). BCC Research. Renewable energy: Technologies and Global Markets. July 2019. Report Code: EGY049D

[34] Proyecto Manubuild. Open Building Manufacturing. (2005 – 2009). Call: FP6-2003-NMP-NI-3. Grant Agreement: 515825

[35] CIB W 104 Open Building Implementation, http://open-building.org/

[36] International Group on Lean Construction, http://www.iglc.net/

[37] Del Águila, A. (2006). Industrialización de la edificación de viviendas. Tomo 1: Sistemas. Mairea Libros. ISBN/ISSN: 978-84-934711-3-2.

[38] Laubier, R., Burfeind, A., Arnold, S., Witthöft, S., & Wunder. M., (2019). The Offsite Revolution in Construction. Boston Consulting Group (BCG). https://www.buildoffsite.com/content/uploads/2019/06/BCG-The-Offsite-Revolution-in-Construction-May-2019-R_tcm40-219473.pdf

[39] Teng, Y., Mao, C., Liu, G., & Wang, X. (2017). Analysis of stakeholder relationships in the industry chain of industrialized building in China. Journal of Cleaner Production, 152, 387–398. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.094

[40] Xue, H., Zhang, S., Su, Y., Wu, Z., & Jing, R. (2018). Effect of stakeholder collaborative management on off-site construction cost performance. Journal of Cleaner Production, 184, 490–502. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.258

[41] McKay, L. J., Gibb, A. G., Blismas, N. G., Pendlebury, M. C., Haslam, R. A. (2004) HASPREST - Health and Safety implications from off-site production, European Construction Institute, ISBN: 0 947974 16 4

[42] Li, Z., Qiping, G., & Alshawi, M. (2014). Measuring the impact of prefabrication on construction waste reduction: An empirical study in China. "Resources, Conservation & Recycling," 91, 27–39. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.07.013

[43] McGraw-Hill Construction Research & Analytics. (2011). Prefabrication and Modularization. Increasing Productivity in the Construction Industry. McGraw-Hill Construction. ISBN: 978-1-934926-35-2

[44] National Audit Office. (2005). Using modern methods of construction to build homes more quickly and efficiently. https://www.nao.org.uk/wp-content/uploads/2005/11/mmc.pdf

[45] Generalova, E. M., Generalov, V. P., & Kuznetsova, A. A. (2016). Modular buildings in modern construction. Procedia Engineering, 153, 167–172. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.098

[46] D'Agostino, D., Marino, C., Minichiello, F., & Russo, F. (2017). Obtaining a NZEB in Mediterranean climate by using only on-site renewable energy: is it a realistic goal? Energy Procedia, 140, 23–35. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.120

[47] International energy Agency (IEA). (2019). Tracking Clean Energy Progress, Assessing critical energy technologies for global clean energy transitions. Building envelopes. https://www.iea.org/reports/tracking-buildings/building-envelopes

[48] Kalogirou, S. A. (2004). Solar thermal collectors and applications Progress in Energy and Combustion Science. 30 231–295 https://doi.org/10.1016/j.pecs.2004.02.001

[49] Munari Probst, M.C., & Roecker, C., (2011) Architectural Integration and Design of Solar Thermal Systems. 1st Edition. EPFL Press. Lausanne, Switzerland. ISBN-13: 978-0415667913

[50] Singh, R., Lazarus, I. J., & Souliotis, M. (2016). Recent developments in integrated collector storage (ICS) solar water heaters: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 54, 270–298. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.006

[51] Kalogirou, S., Tripanagnostopoulos, Y. & Souliotis, M. (2005). Performance of solar systems employing collectors with colored absorber, Energy and Buildings 37 824–835. doi:10.1016/J.ENBUILD.2004.10.011.

[52] Hadorn J.-C. (Ed.), (2015). Solar and Heat Pump Systems for Residential Buildings. Wiley - ISBN: 978-3-433-03040-0.

[53] Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). Solar Engineering of Thermal Processes (4th Edition). Wiley.

[54] Solar Panel Plus. http://www.solarpanelsplus.com/evacuated-tube-collectors/

[55] Wikiwand. https://www.wikiwand.com/en/Solar_thermal_collector

[56] Liang, R., Ma, L., Zhang, J., & Zhao, D. (2011). Theoretical and experimental investigation of the filled-type evacuated tube solar collector with U tube. Solar Energy, 85(9), 1735–1744. https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.04.012

[57] Suman, S., Khan, M. K., & Pathak, M. (2015). Performance enhancement of solar collectors - A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.087

[58] Bonhôte, P., Eperon, Y., & Renaud, P. (2009). Unglazed coloured solar absorbers on façade: Modelling and performance evaluation. Solar Energy, 83, 799–811. https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.11.014

[59] Ghazi, S., Sayigh, A., & Ip, K. (2014). Dust effect on flat surfaces - A review paper. Renewable and Sustainable Energy Reviews. https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.02.016

[60] Hawwash, A. A., Abdel, A. K., Nada, S. A., & Ookawara, S. (2018). Numerical Investigation and Experimental Verification of Performance Enhancement of Flat Plate Solar Collector Using Nanofluids. Applied Thermal Engineering, 130, 363–374. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.11.027

[61] So, A., & Menlik, T. (2008). Determination of efficiency of flat-plate solar collectors using neural network approach, 35, 1533–1539. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2007.08.080

[62] Burch, J., Salasovich, J., Hillman, T. (2005). An Assessment of Unglazed Solar Domestic Water Heaters. National Renewable Energy Laboratory. Conference Paper NREL/CP-550-37759 December 2005. https://www.nrel.gov/docs/fy06osti/37759.pdf

[63] German Solar Energy Society - DGS. (2010). Planning and Installing Solar Thermal Systems: A Guide for Installers, Architects and Engineers. (2nd Edition). Routledge. ISBN-10: 1844077608.

[64] Florida Solar Design Group. https://floridasolardesigngroup.com/glazed-solar-pool-heating-collectors-florida/

[65] Facade and roof integrated solar collectors with a combination of elastomer tubes and metal form sheet elements. FP4 Project. Grant agreement ID: JOR3980236. http://erg.ucd.ie/enerbuild/collect.html

[66] Bokor, B., Akhan, H., Eryener, D., & Kajtár, L. (2017). Theoretical and experimental analysis on the passive cooling effect of transpired solar collectors. Energy & Buildings, 156, 109–120. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.09.063

[67] Wang, X., Lei, B., Bi, H., & Yu, T. (2017). A simplified method for evaluating thermal performance of unglazed transpired solar collectors under steady state. Applied Thermal Engineering, 117, 185–192. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.01.053

[68] Anderson, T. N., Duke, M., & Carson, J. K. (2010). The effect of colour on the thermal performance of building integrated solar collectors. Solar Energy Materials and Solar Cells, 94(2), 350–354. https://doi.org/10.1016/j.solmat.2009.10.012

[69] IEA, SHC Task 39. Polymeric Materials for Solar Thermal Applications. http://task39.iea-shc.org

[70] Missirlis, D., Martinopoulos, G., Tsilingiridis, G., Yakinthos, K., & Kyriakis, N. (2014). Investigation of the heat transfer behaviour of a polymer solar collector for different manifold con fi gurations. Renewable Energy, 68 (April 2013), 715–723. https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.03.008

[71] Sable, A. (2017). Experimental and economic analysis of concrete absorber collector solar water heater with use of dimpled tube. Resource-Efficient Technologies, (3), 483–490. https://doi.org/10.1016/j.reffit.2017.06.001

[72] O 'hegarty, R., Kinnane, O., & Mccormack, S. J. (2017). Parametric investigation of concrete solar collectors for façade integration. Solar Energy, 153, 396–413. https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.05.092

[73] Yang, Y., Wang, Q., Xiu, D., Zhao, Z., & Sun, Q. (2013). A building integrated solar collector: All-ceramic solar collector. Energy & Buildings, 62, 15–17. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.03.002

[74] Sun, X., Sun, X., Li, X., Wang, Z., He, J., & Wang, B. (2014). Performance and building integration of all-ceramic solar collectors. Energy & Buildings, 75, 176–180. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.01.045

[75] Pugsley, A., Zacharopoulos, A., Smyth, M., & Mondol, J. (2017). Performance evaluation of the senergy polycarbonate and asphalt carbon nanotube solar water heating collectors for building integration. Renewable Energy. https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.10.082

[76] Nábìlek, B. Kiran, E., Türksoy, F., Yazar, a:, (1999). Performance of an unglazed textile-plastic solar absorber, Renewable Energy. 16 635–638. doi:10.1016/S0960-1481(98)00241-9

[77] Smith, C., & Weiss, T. (1977). Design application of the Hottel-Whillier-Bliss equation. Solar Energy, Volume 19 Pages 109-113.

[78] Vancouver Renewable Energy. http://www.vrec.ca

[79] Bunea, M., Perers, B., Eicher, S., Hildbrand, C., Bony, J., & Citherlet, S. (2015). Mathematical modelling of unglazed solar collectors under extreme operating conditions. Solar Energy.

[80] Anderson, T., Duke, M., & Carson, J. (2013). Performance of an unglazed solar collector for radiant cooling. Proceedings of Australian Solar Cooling 2013 Conference, Sydney, April 2013.

[81] O'Hegarty, R., Kinnane, O., & McCormack, S. J. (2016). Review and analysis of solar thermal facades. Solar Energy, 135, 408–422. https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.06.006

[82] UNE-EN 12975-1:2006+A1:2011, Sistemas solares térmicos y componentes. Captadores solares. Parte 1: Requisitos generales.

[83] UNE-EN ISO 9806:2020. Energía solar. Captadores solares térmicos. Métodos de ensayo. (ISO 9806:2017)

[84] UNE-EN 12976-1:2020 Sistemas solares térmicos y sus componentes. Sistemas prefabricados. Parte 1: Requisitos generales.

[85] UNE-EN 12976-2:2020 Sistemas solares térmicos y componentes. Sistemas prefabricados. Parte 2: Métodos de ensayo.

[86] UNE-EN 12977-1:2019 Sistemas solares térmicos y sus componentes. Instalaciones a medida. Parte 1: Requisitos generales para los calentadores de agua solares y las instalaciones solares combinadas.

[87] UNE-EN 12977-2:2019 Sistemas solares térmicos y sus componentes. Instalaciones a medida. Parte 2: Métodos de ensayo para los calentadores de agua solares y las instalaciones solares combinadas.

[88] UNE-EN 12977-3:2019 Sistemas solares térmicos y sus componentes. Instalaciones a medida. Parte 3: Métodos de ensayo del rendimiento de los acumuladores de agua de calentamiento solar.UNE-EN ISO 9806:2020. Energía solar. Captadores solares térmicos. Métodos de ensayo. (ISO 9806:2017)

[89] IEA Solar Heating & Cooling Technology Collaboration Programme. https://www.iea-shc.org/

[90] Weiss, W., Spörk-Dür, M., (2020). Solar Heat Worldwide. Global Market Development and Trends in 2019. Detailed Market Figures 2019. 2020 Edition. IEA Solar Heating & Cooling Programme.

[91] Grubb, P. J., Gorgolewski, M. T., Lawson, R. M., (2001), Building Design Using Cold Formed Steel Sections: Light Steel Framing in Residential Construction. The Steel Construction Institute. Publication P301. U.K., ISBN-10: 1859421210, ISBN-13: 978-1859421215. Steel Construction Institute. https://steel-sci.com/SCI.

[92] Metsec Purlins. https://www.metsec.com

[93] ArcelorMittal. Productos para fachadas. Soluciones Globalwall. Sistema IN221 y Sistema 227 ST. https://construction.arcelormittal.com/fr-en/search/products/all/wall-and-facade/wall-build-up-systems

[94] Europerfil. Sistemas Constructivos. Sistema Eurohábitat. http://europerfil.com/web/soluciones/7/sistemas-constructivos/fachada-ventilada-eurohabitat

[95] ArcelorMittal. Productos para fachadas Sistemas panel sándwich Solución Modular. https://construction.arcelormittal.com/es-es/producto/fachada/paneles-sandwich-de-fachada/modular

[96] Tata Steel . Trimapanel flat ®.

https://www.tatasteelconstruction.com/en_GB/Products/Building-envelope/Walls/sandwich-panel-systems/Microrib-and-flat-panels/Trimapanel%C2%AE-flat

[97] Steelconstruction.info. http://www.steelconstruction.info/Building_envelopes

[98] Paneles ACH. Sistema Panel Sandwich Madera ACH. https://www.panelesach.com/paneles-sandwich

[99] Research Fund for Coal and Steel (RFCS), http://ec.europa.eu/research/industrial_technologies/rfcs_en.html

[100] Labory, F., et Al. “Energy efficient buildings through innovative systems in steel”, EEBIS Project. Grant Agreement nº: RFSR-CT-2003-0017. Final Report; RFCS Publications: 2008. KI-NA-23180-EN-S. ISBN 978-92-79-07681-7. ISSN 1018-5593. https://publications.europa.eu/en/web/general-publications/publications

[101] Feldmann, M., et Al. “Energy and thermal improvements for construction in steel”, ETHICS Project. Grant Agreement nº: RFSR-CT-2008-0038. Final Report; RFCS Publications:

2013. KI-NA-26010-EN-N. ISBN 978-92-79-30789-8. doi:10.2777/17106 https://publications.europa.eu/en/web/general-publications/publications

[102] Santos, P., Silva, L., Ungureanu, V. (2012). Energy Efficiency of Lightweight Steel-framed Buildings, ISBN 978-92-9147-105-8, ECCS European Convention for Constructional Steelwork, ww.eccspublication.eu

[103] Zalewski, L., Lassue, S., Rousse, D., & Boukhalfa, K. (2010). Experimental and numerical characterization of thermal bridges in prefabricated building walls. Energy Conversion and Management, 51(12), 2869–2877. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.06.026

[104] Lipták-Váradi, J. (2010). Equivalent thermal conductivity of steel girders with slotted web. Periodica Polytechnica Civil Engineering, 54(2), 163–170. https://doi.org/10.3311/pp.ci.2010-2.12

[105] Gorgolewski, M. (2007). Developing a simplified method of calculating U-values in light steel framing. Building and Environment, 42(1), 230–236. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.07.001

[106] Karambakkam B. (2004). Transient conduction heat transfer in two-dimensional and heavy one-dimensional walls. Mechanical and Aerospace Engineering Department of Oklahoma State University (USA).

[107] Arregi, B., Elguezabal, P., & Álvarez, I. (2019). Composite polymeric materials as an alternative to aluminium for improved energy performance of ventilated façade systems. Journal of Physics: Conference Series, 1343. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1343/1/012196

[108] CSTB. Reglementation 2000: Parois acier avec des ponts thermiques integres. Comission Th-Bât, France (9-2-2004)

[109] UNE. Normalización Española. UNE-EN 14509: 2014. Paneles sándwich aislantes autoportantes de doble cara metálica. Productos hechos en fábrica. Especificaciones.

[110] EASIE. Ensuring Advancement in Sandwich Construction Through Innovation and Exploitation. Grant agreement number: 213302. FP7. http://www.ppa-europe.eu/easie_research.html

[111] European Commission. 7th Framework Programme. https://ec.europa.eu/research/fp7/index_en.cfm

[112] Joudi, A., Svedung, H., & Rönnelid, M. (2011). Energy efficient surfaces on building sandwich panels—A dynamic simulation model. Energy and Buildings.

[113] Environmental Product Declaration. Insulated Metal Panels. Wall and roof panel systems. Metal Construction Association (MCA). 2013. https://www.metalconstruction.org/EPDs

[114] Dedecker, K., Deschaght, J., Kumar, R. (2008). Sandwich Panels Supporting Growth with a stablished and Proven Technology. https://www.semanticscholar.org/paper/Sandwich-Panels-Supporting-Growth-with-an-and-Everberg-Polyurethanes/7c252bb48e8ab51b39d1b2484369dc1005a2c98b

[115] Elguezabal, P., Chica, J. A., Meno, S., Lopez, D., Baragaño, S. (2013). Case Study – Steel intensive project for building renovation in Spain. 3th Workshop of SB-Steel Project “Case study for a new design Approach” Organized by ESTEP WG3, ECCS TC14 and. January 29, 2013. Timisoara, Romania. Proceedings; ISBN: 978-973-638-526-1. pp. 262 – 270

[116] Ge, T. S., Wang, R. Z., Xu, Z. Y., Pan, Q. W., Du, S., Chen, X. M., Ma, T., Wu, X.N., Sun X.L., Chen, J. F. (2017). Solar heating and cooling: Present and future development. Renewable Energy, 126, 1126–1140. https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.06.081

[117] Giovanardi, A., Passera, A., Zottele, F., & Lollini, R. (2015). Integrated solar thermal façade system for building retrofit. Solar Energy, 122, 1100–1116. https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.10.034

[118] Zhang, X., Shen, J., Tang, L., Yang, T., Xia, L., Hong, Z., Wang, L., Wu, Y., Shi, Y., Xu, P., Liu, S. (2015). Building Integrated Solar Thermal (BIST) Technologies and Their Applications: A Review of Structural Design and Architectural Integration. Journal of Fundamentals of Renewable Energy and Applications, 5(5). https://doi.org/10.4172/20904541.1000182

[119] Lai, C.-M., & Hokoi, S. (2015). Solar façades: A review. Building and Environment, 91, 152–165. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.01.007

[120] Quesada, G., Rousse, D., Dutil, Y., Badache, M., & Hallé, S. (2012). A comprehensive review of solar facades. Opaque solar facades. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16, 2820–2832. https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.078

[121] Quesada, G., Rousse, D., Dutil, Y., Badache, M., & Hallé, S. (2012). A comprehensive review of solar facades. Transparent and translucent solar facades. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16, 2643–2651. https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.059

[122] Visa, I., Moldovan, M., Comsit, M., Neagoe, M., & Duta, A. (2017). Facades Integrated Solar-thermal Collectors - Challenges and Solutions. Energy Procedia, 112, 176 – 185. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1080

[123] COST Action TU1403. Adaptive Facades Network. http://tu1403.eu/

[124] Nagy, Z., Svetozarevic, B., Jayathissa, P., Begle, M., Hofer, J., Lydon, G., Willmann, A., Schlueter, A. (2016). The Adaptive Solar Facade: From concept to prototypes. Frontiers of Architectural Research, 5, 143–156. https://doi.org/10.1016/j.foar.2016.03.002

[125] Attia, S., Bilir, S., Safy, T., Struck, C., Loonen, R., & Goia, F. (2018). Current trends and future challenges in the performance assessment of adaptive façade systems. Energy & Buildings, 179, 165–182. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.09.017

[126] Aelenei, D., Aelenei, L., & Pacheco, C. (2016). Adaptive Façade: concept, applications, research questions. Energy Procedia, 91, 269–275. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.06.218

[127] Juaristi, M., Gómez-acebo, T., & Monge-barrio, A. (2018). Qualitative analysis of promising materials and technologies for the design and evaluation of Climate Adaptive Opaque Façades. Building and Environment, 144(May), 482–501. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.08.028

[128] Blanco, J.M., Arriaga, P., Roji, E., Cuadrado, J. (2014). Investigating the thermal behavior of perforated double-skin perforated sheet façades: Part A: Model characterization and validation procedure; optimization assessment., Building & Environment, 82, (2014) 50-62. DOI: https://doi.org/ 10.1016/j.buildenv.2014.08.007

[129] Webb, M., Aye, L., & Green, R. (2018). Simulation of a biomimetic façade using TRNSYS. Applied Energy, 213, 670–694. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.08.115

[130] Probst, M. M., & Roecker, C. (2007). Towards an improved architectural quality of building integrated solar thermal systems (BIST). Solar Energy, 81, 1104–1116. https://doi.org/10.1016/j.solener.2007.02.009

[131] Lamnatou, C., Mondol, J.D., Chemisana, D., Maurer, C. (2015). Modelling and simulation of Building-Integrated solar thermal systems: Behaviour of the coupled building / system configuration. Renew. Sustain. Energy Rev, 48 (2015) 178–191. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.075.

[132] D'Antoni, M., Bonato, P., Fedrizzi, R. (2018). On the development of a façade-integrated solar water storage. Journal of Facade Design and Engineering, v. 6, n. 2, p. 009-020, june 2018. ISSN 2213-3038. doi: https://doi.org/10.7480/jfde.2018.2.2048.

[133] IEA SHC Task 41 Solar energy and Architecture. http://task41.iea-shc.org/

[134] Munari Probst, M. C., Roecker, C, (Editors), (2012), Solar energy systems in architecture - Integration Criteria and Guidelines, Report T.41.A.2: IEA SHC Task 41 Solar energy and Architecture. http://task41.iea-shc.org/

[135] Stanciu, C. & Stanciu, D. (2014). Optimum tilt angle for flat plate collectors all over the World – A declination dependence formula and comparisons of three solar radiation models. Energy Conversion and Management. Vol. 81 (2014), pp. 133-143

[136] Reda, F., Arcuri, N., Loiacono, P., & Mazzeo, D. (2015). Energy assessment of solar technologies coupled with a ground source heat pump system for residential energy supply in Southern European climates. Energy, 91, 294–305. https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.08.040

[137] Elguezabal, P., Arregi, B. (2018). An analysis of the potential of envelope-integrated solar heating and cooling technologies for reducing energy consumption in European climates. Journal of Facade Design and Engineering. Vol. 6, nº 2 (2018), 085-094. https://doi.org/10.7480/jfde.2018.2.2102

[138] Petrichenko, K., Ürge-Vorsatz, d., Cabeza, L.F. (2019). Modeling global and regional potentials for building-integrated solar energy generation. Energy and Buildings. Volume 198, 1 September 2019, Pages 329-339, https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.06.024

[139] Fachada Solabs®. Fuente: http://leso.epfl.ch/page-37325-en.html

[140] Giovanardi. A. (2012). Integrated solar thermal facade component for building energy retrofit. PhD Thesis. Università degli Studi di Trento. http://eprints-phd.biblio.unitn.it/782/

[141] Schober H., Brandl, D., Zellinger, M., Mach, T., Englhardt, O. (2015). Hybrid Element Façade – Thermal engineering and related structural evaluation of a solar activated integral panel. Advanced Building Skins 2015 Proceedings. https://abs.green/es/homs-es/

[142] Proyecto Bionicol. Development of a bionic solar collector with aluminium roll-bond absorber. FP7 Project. Grant Agreement number: 219036. https://cordis.europa.eu/project/rcn/90331/factsheet

[143] Sistema “WAF Solar façade”. http://www.waf.at

[144] Sistema Triplesolar. www.triplesolar.eu

[145] Slebos, H., Bos, J. Building provided with a heating device. Patent no. WO0194852A1

[146] Slebos, H. Universal and multi-functional building component. Patent no. US 6079170

[147] Mager, C.P., Slebos, H., Van Buuren., T. H. Heat exchanger panel, suitable as a construction element in the form of a ceiling, wall, roof and floor element. Patent no. NL2002448C2

[148] Mager, C.P., Slebos, H., Van Buuren., T. H. Heat exchanger panel, suitable as a construction element in the form of a ceiling, wall, roof and floor element. Patent no. NL2003120C2

[149] Sistema Quick Step® de Rheinzink. https://www.rheinzink.de/produkte/

[150] German Architects. https://www.german-architects.com/de/pages/praxis/praxis-39-12-Rheinzink

[151] Arcguide+. https://www.arcguide.de/produktneuheiten/innovationspreis-fuer-rheinzink/

[152] Sistema Tecu Solar de KME. https://www.kme.com/es/copper-division/arquitectura/tecu-surfaces/

[153] Arketipo Architettura del fare. https://www.arketipomagazine.it/tecu-solar-system/

[154] COMBISOL Project. Solar Combi Systems Promotion and Standardization. (2010) Final report. https://ec.europa.eu/energy/intelligent/projects/sites/iee-projects/files/projects/documents/combisol_publishable_report_en.pdf

[155] Solar and heat pump systems. SHC Task 44. IEA – Solar Heating and Cooling Programme. http://task44.iea-shc.org/

[156] IEA Heat Pump Programe (HPP). https://heatpumpingtechnologies.org/publications/iea-heat-pump-programme/

[157] European Commission. Commission Decision. 2013/114/UE. of 1 March 2013, establishing the guidelines for Member States on calculating renewable energy from heat pumps from different heat pump technologies pursuant to Article 5 of Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council

[158] Buker, M. S., & Riffat, S. B. (2016). Solar assisted heat pump systems for low temperature water heating applications: A systematic review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 55, 399–413. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.157

[159] Wang, Z., Guo, P., Zhang, H., Yang, W., & Mei, S. (2017). Comprehensive review on the development of SAHP for domestic hot water. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 72, 871–881. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.127

[160] Vaishak, S., & Bhale, P. V. (2019). Photovoltaic / thermal-solar assisted heat pump system: Current status and future prospects. Solar Energy, 189, 268–284. https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.07.051

[161] Emmi, G., Zarrella, A., & De Carli, M. (2017). A heat pump coupled with photovoltaic thermal hybrid solar collectors: A case study of a multi-source energy system. Energy Conversion and Management, 151(August), 386–399. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.08.077

[162] Dannemand, M., Sifnaios, I., Tian, Z., & Furbo, S. (2020). Simulation and optimization of a hybrid unglazed solar photovoltaic- thermal collector and heat pump system with two storage tanks. Energy Conversion and Management, 206(October 2019), 112429. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112429

[163] Schmidt, C., Schäfer, A., & Kramer, K. (2018). Single Source “Solar Thermal” Heat Pump for Residential Heat Supply: Performance with an Array of Unglazed PVT Collectors. https://doi.org/10.18086/eurosun2018.01.18

[164] Bertram, E., Glembin, J., Scheuren, J., Rockendorf, G., & Zienterra, G. (2008). Unglazed Solar Collectors in Heat Pump Systems: Measurement, Simulation and Dimensioning. In EuroSun 2008, Conference Proceedings.

[165] Carbonell, D., Haller, M. Y., & Frank, E. (2014). Potential benefit of combining heat pumps with solar thermal for heating and domestic hot water preparation. Energy Procedia, 57, 2656–2665. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.277

[166] Lerch, W., Heinz, A., & Heimrath, R. (2015). Direct use of solar energy as heat source for a heat pump in comparison to a conventional parallel solar air heat pump system. Energy & Buildings, 100, 34–42. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.03.006

[167] Sistema de colector AS de Energie Solaire. http://www.energie-solaire.com

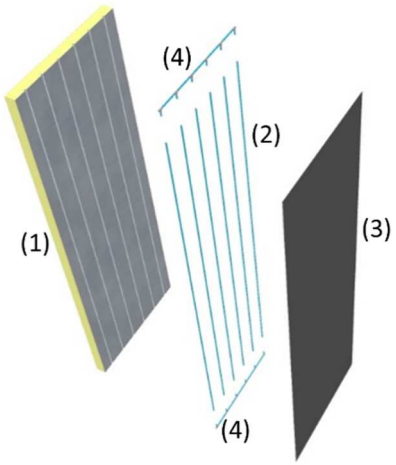
[168] Energie Thermodynamic solar energie. www.energie.pt

[169] Sun, X., Wu, J., Dai, Y., & Wang, R. (2014). Experimental study on roll-bond collector / evaporator with optimized- channel used in direct expansion solar assisted heat pump water heating system. Applied Thermal Engineering, 66(1–2), 571–579. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.02.060

[170] Thermasol. Paneles solares termodinámicos. www.thermasol.ie

# CAPITULO II. Propuesta de desarrollo de Fachada Solar Activa a través de un colector no vidriado integrado en un panel sándwich


1. INTRODUCCION
2. PROPUESTA DE NUEVO DISEÑO DE COLECTOR SOLAR INTEGRADO EN FACHADA
3. ANALISIS DE ALTERNATIVAS PARA EL DISEÑO DE LA FACHADA ACTIVA
4. MATERIALIZACIÓN DE LA SOLUCIÓN EN UN PANEL MODULAR
5. ANALISIS DE ALTERNATIVAS. PARAMETROS Y SU INFLUENCIA
6. CONCLUSIONES
7. REFERENCIAS


*En este segundo capítulo se desarrolla una propuesta de fachada solar tomando la tecnología de los paneles sándwich de acero como base. Considerando las conclusiones del capítulo previo, se pretende proporcionar una alternativa que sea competitiva y con un alto grado de integración, pero, también, con suficiente potencial para alcanzar resultados relevantes en términos de captación solar. Se trata de considerar los componentes, materiales y geometrías principales del diseño, optimizándolo, aprovechando las propiedades singulares del acero.*

# 1. INTRODUCCION

El análisis del estado del arte ha puesto de manifiesto que los avances en el ámbito de las tecnologías solares para edificación han sido numerosos y sustanciales en los últimos años, sin embargo, es un sector que no está cobrando el suficiente protagonismo que se espera de una tecnología con tanto potencial. Como vía para progresar hacia un mayor nivel de aplicación de este tipo de soluciones, las fachadas solares y de forma específica, la integración de los colectores solares en los edificios es una clara apuesta hacia un mayor nivel de contribución de las fuentes renovables.

El interés en incorporar esta tecnología en las envolventes viene motivado por la función de intercambio energético que desempeña este elemento en la frontera entre los ambientes interior y exterior. Por otro lado, la incorporación de esta energía renovable al edificio permite su interconexión con sistemas térmicos variados que aprovechan las particularidades de una integración de tal tipo, pero que, en definitiva, consiste en dotar al edificio de una fuente adicional de energía a través de un componente, su fachada, que tradicionalmente no contaba con dicha funcionalidad.

En este segundo capítulo de la tesis, se presenta el concepto novedoso del sistema que busca captar la energía solar, para poder aprovecharla en forma de calor, para cubrir las demandas energéticas del edificio, específicamente para ACS (Agua Caliente Sanitaria) y calefacción. De esta forma, se plantea un desarrollo enfocando el diseño hacia una integración de un colector no vidriado en una solución de fachada industrializada, basada en la tecnología constructiva de paneles sándwich de acero.

El proceso de definición del colector integrado descrito en el presente capítulo comenzará partiendo de la idea y la conceptualización de la solución, aspectos que se desarrollarán en el apartado 2, identificando los elementos principales que componen el propio sistema de fachada activa. Así, se planteará un análisis y desarrollo individual de los componentes principales en el apartado 3, para, a continuación, proponer en el cuarto apartado la materialización del sistema en un panel modular como unidad mínima que define el diseño del colector solar integrado.

En el quinto apartado desarrolla el estudio paramétrico con el que se quieren analizar diseños y alternativas a los prototipos construidos. De esta forma, se enumerarán los parámetros a valorar, entre los que se analizarán los materiales, dimensiones, relaciones o factores de operación del sistema, así como los rangos dentro de los cuales se quieren analizar los diferentes factores. Se diferencian los parámetros de diseño asociados a la materialización de la solución y los parámetros dinámicos que pueden variar cuando se opera el sistema.

Como conclusión última de este segundo capítulo de la tesis y, tras haber planteado el diseño conceptual y la necesidad de comprender mejor el efecto de los factores de diseño, se investigará la posibilidad de plantear el estudio paramétrico mediante un enfoque analítico, concluyendo que desarrollar un modelo CFD (por fluido dinámica computacional) proporciona mayores posibilidades para el estudio que se pretende desarrollar. El contenido del siguiente capítulo, tercero de la tesis, describirá el proceso de definición de dicho modelo CFD, mientras que en el capítulo IV se detallarán los datos obtenidos en las diferentes campañas experimentales con los prototipos instalados en un edificio real.

# 2. PROPUESTA DE NUEVO DISEÑO DE COLECTOR SOLAR INTEGRADO EN FACHADA

## 2.1. Tipología del colector. Concepto basado en el panel sándwich

La propuesta de desarrollo está contextualizada en el empleo de soluciones industrializadas, ligeras y que empleen el acero por lo que se centra en el panel sándwich como uno de los exponentes principales de dicha filosofía de construcción. Por tanto, el diseño va a estar enfocado a explotar el potencial de una solución que empleando esta tecnología pueda convertirse en una fachada activa en forma de colector solar. Así, se va a trabajar en el diseño pormenorizado de una solución de colector solar para ser empleado como fachada activa en un concepto que emplee la tecnología de los paneles sándwich metálicos como base para el desarrollo.

Para lograr esa "activación" del panel, se pueden considerar las tres tecnologías que principalmente se emplean para resolver los colectores térmicos integrados en fachada: tubos de vacío, colectores vidriados y no vidriados. Los tubos de vacío, debido a las limitaciones inherentes al diseño basado en tubos cilíndricos trasparentes, no resultan de aplicación en este caso puesto que la forma en la que se conciben esas soluciones queda alejada del planteamiento actual en el que se pretende aprovechar al máximo el concepto de panel plano y modular. Esto se debe a que el desarrollo se plantea como una aplicación de estas tecnologías en los sistemas industrializados con paneles sándwich metálicos y, a pesar de que los sistemas de vacío tienen una mayor potencia y altas temperaturas de funcionamiento, que ofrecen un mayor rendimiento en dichos niveles térmicos, se considera que son soluciones demasiado complejas y con un alto coste: algo más de 2 veces el coste de los vidriados y hasta 4 veces el de los no vidriados (véase la Tabla 3 del apartado 2.1.2 en el Capítulo I). Tomando en consideración que para el presente desarrollo se buscan soluciones con un nivel tecnológico acotado y que supongan sistemas más sencillos y asequibles en términos de coste, se descartan los sistemas de tubos de vacío para el desarrollo de la fachada activa.

De esta forma, se toman en consideración los otros dos sistemas potenciales para incorporar al panel y entre las diferencias entre una solución vidriada y otra no vidriada, considerando que la primera pueda entenderse como una evolución respecto de la segunda, las consideraciones principales entre ambos conceptos se pueden resumir en los siguientes tres aspectos:

1. Prestaciones térmicas de la fachada activa a modo de colector solar:
    a. Las temperaturas y presiones que se alcanzan en el no vidriado son significativamente menores (<80 °C), lo que simplifica el sistema, evitando así la necesidad de emplear materiales que soporten temperaturas elevadas o el empleo de válvulas de seguridad entre otros factores.
    b. Sin embargo, las temperaturas del vidriado permiten obtener en algunos casos frío solar y el no vidriado no alcanza dichos rangos.
2. Aspectos asociados a la asequibilidad tecnológica y económica:
    a. La simplicidad del sistema no vidriado con menos componentes. Básicamente: el absorbedor, circuito hidráulico, aislamiento y resto de componentes.

b. El coste menor del no vidriado, por la simplicidad indicada (40 – 50% menor que el vidriado). Valores promedio del estado del arte indicados en la Tabla 3 del Capítulo I.

3. Integración arquitectónica de la solución:
    a. El peso, más ligero en el caso del no vidriado al no contar con la lámina exterior de vidrio.
    b. La posibilidad de apreciar el acabado exterior del acero del absorbedor, frente al vidriado en el que se percibe el vidrio como acabado, es un factor asociado al acabado o integración arquitectónica. En base a estos criterios, no basados en prestaciones energéticas del colector, en ciertas ocasiones se prescribirá uno, o ambos, acabados dará diseñar la envolvente.

Como conclusión, el desarrollo se plantea como un sistema no vidriado motivado fundamentalmente por la simplicidad, así como por el interés en plantear una solución que permita explotar al máximo la contribución del acero como elemento fundamental del panel y por tanto del absorbedor en ausencia del vidrio. Asimismo, se asume que una integración arquitectónica del panel con acabado metálico puede ser mayor que con el vidrio para las aplicaciones en paños ciegos previstas [171], si bien, se considera que en cualquier caso y una vez probada la viabilidad de esta primera solución, se podrá plantear como desarrollo futuro una adaptación del sistema que incorpore el vidrio en la cara exterior, junto con el resto de componentes necesarios para desarrollar un panel vidriado fundamentado en el mismo concepto.

Para el caso de los tubos de vacío, la presencia del material del acabado exterior en acero que se quiere potenciar en este desarrollo quedaría en un nivel de protagonismo muy inferior dentro de la complejidad del sistema de vacío, por lo que se considera que una progresión hacia una solución integrando dicha tecnología queda fuera del alcance del estudio y la línea de investigación presentada a continuación.

## 2.2. Análisis de los elementos principales de la fachada solar térmicamente activa: panel sándwich y circuito hidráulico

Tomando en consideración que el elemento que se pretende desarrollar es una fachada activa y que para ello se parte de un sistema constructivo comercial existente, para acometer el diseño se deben tener en consideración los dos elementos principales que componen el sistema activo: el panel y el circuito hidráulico. En el siguiente apartado 3 se procederá a analizar en primer lugar alternativas para la definición de estos dos componentes de forma individual, para plantear a continuación la propuesta para el sistema combinado.

Por tanto, se va a realizar en primer lugar una introducción y descripción tanto para el panel (apartado 3.1) como para el circuito hidráulico (apartado 3.2) analizando los parámetros que los definen, su función principal y la forma de resolverlos para obtener la solución activa. A continuación, tomando en consideración estos factores se planteará una solución combinada de fachada activa (apartado 3.3) que será a la postre el diseño central sobre el que se desarrollarán los estudios y caracterizaciones de interés en la presente tesis.

Uno de los retos principales en el desarrollo es, sin duda, la incorporación del circuito hidráulico al panel, de tal forma que el sistema tenga una integración efectiva y que la solución sea arquitectónicamente atractiva, a la vez que se obtiene un rendimiento térmico competitivo. Por tanto, la disposición de los conductos y su interrelación con el absorbedor serán el hilo conductor que guiará el diseño. Esa combinación entre conductos y chapas metálicas, así como la posición relativa entre ambos, será un aspecto relevante para analizar dentro del apartado 3.3, destacando la singularidad del panel sándwich con chapas de poco espesor y su posible combinación con los conductos.

La de absorber energía solar es una función añadida al panel y la principal fórmula para activarlo y dotarlo de una función de colector solar. En un panel sándwich convencional no existe este elemento como tal, o no se tienen en consideración las temperaturas superficiales como una fuente de e energía, por lo que el convertirlo en un sistema activo supone una modificación sustancial del diseño del componente constructivo, así como de la forma en la que se comporta.

A modo ilustrativo, la Figura 40 siguiente compara las temperaturas que se obtienen en la chapa superficial de un panel sándwich cuando se comporta como una solución estándar o pasiva, frente al caso activo en el que se hace circular un fluido por la cara expuesta de dicho panel [172].

Los datos experimentales obtenidos en el sistema instalado a modo de demostración en el edificio KUBIK® [173], registran para la solución pasiva (sin circulación de fluido), temperaturas superficiales en la piel externa del panel metálico de hasta 72 °C en una serie de días calurosos de noviembre, con un máximo de 22 °C de temperatura ambiente y una radiación de 850 W/m$^2$ (Figura 40 izquierda). Una vez que el agua circula por el circuito hidráulico del colector integrado, la temperatura de la piel exterior disminuye gracias a la acción de refrigeración que ejerce este fluido. Esta energía se captura de forma continua y se almacena en un tanque de acumulación. En la Figura 40 – derecha, se muestra un día representativo de junio, con temperaturas ambiente máximas de 25,3 °C y una radiación de 435 W/m$^2$. Para este caso en el que el panel actúa como un elemento activo, se alcanza una temperatura máxima de la piel exterior de 46,9 °C, y el salto térmico que se registra en el tanque de acumulación en el transcurso del día es de 21,1 °C, con una temperatura pico de 36,3 °C que se obtiene tras 5,23 horas de calentamiento.

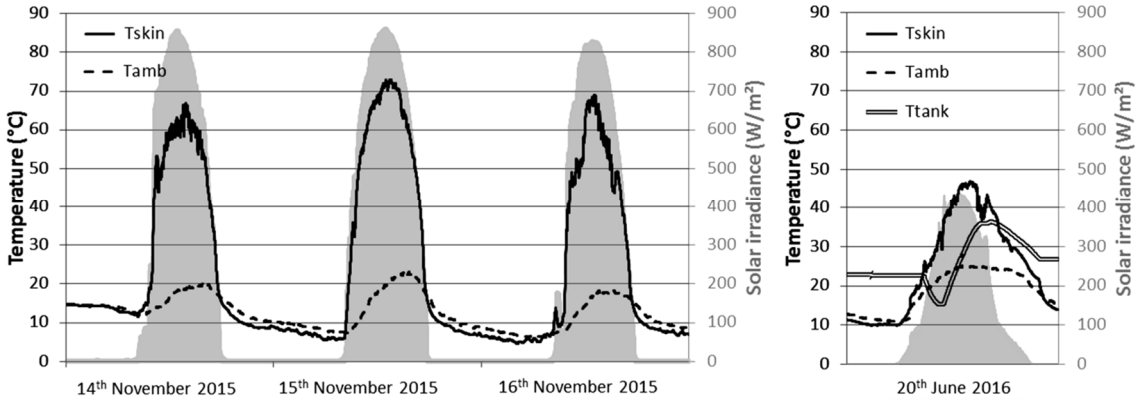



**Figura 40. Temperatura ambiente del aire exterior ($T_{amb}$), Temperatura superficial de la chapa exterior ($T_{skin}$) y del tanque de acumulación ($T_{tank}$) junto con la radiación solar (área sombreada en gris). Datos monitorizados durante pruebas en el edificio experimental KUBIK para contrastar el efecto del panel activo (derecha) frente a una fachada de panel sándwich convencional (izquierda). [172]**

# 3. ANALISIS DE ALTERNATIVAS PARA EL DISEÑO DE LA FACHADA ACTIVA

El objetivo de la presente sección es valorar diferentes alternativas para materializar una fachada activa que contemple los condicionantes y aspectos ya destacados y que consiste principalmente en emplear una solución de panel sándwich como elemento base a la que se acopla un circuito hidráulico. Por tanto, se va a analizar de forma independiente cada uno de estos elementos valorando sus componentes y aspectos más significativos para, a continuación, plantear una solución combinada de fachada activa.

La descomposición del sistema en panel y circuito hidráulico da como resultado los siguientes factores de diseño a valorar como alternativas:

- Para el elemento panel los factores principales son:
    - Absorbedor
    - Chapas metálicas
    - Aislamiento
    - Dimensiones principales del panel
- Para el circuito hidráulico:
    - Conductos longitudinales
    - Configuración del circuito
    - Caudal
    - Fluido calor portador
- Solución combinada en un panel
    - Posición relativa del conducto
    - Interacciones entre circuito y panel
    - Resto de componentes para resolver el sistema del circuito solar

En los siguientes apartados se irán desgranando los aspectos principales con los que se definen estos parámetros, describiéndolos a través de: los materiales empleados, dimensiones, geometrías y demás factores de diseño requeridos para definir la solución de fachada activa.

De cara a plantear el análisis presentado a continuación, cabe destacar la función principal del conjunto, así como de cada uno de sus componentes, tomando en consideración los tres fenómenos principales de transferencia de calor que se darán en el sistema estudiado: conducción, radiación y convección. Así, la función principal del colector será la de absorber la energía exterior asociada a la radiación, para transferirla al fluido calor portador por conducción y convección a través de los diferentes componentes del circuito hidráulico. En todos los casos se tratará de minimizar las pérdidas por convección, radiación y conducción.

Las siguientes ecuaciones representan la energía transferida debido a estos tres fenómenos para el caso considerado, distinguiendo conducción (ecuación (1)), convección (ecuación (2)), y radiación (ecuación (3)). Para los fenómenos de conducción ($Q_{cond}$) y convección ($Q_{conv}$), se asume una transferencia de calor por superficie (A) de un cuerpo más caliente (Temperatura $T_1$) a otro más frío (Temperatura $T_2$) proporcional a la conductividad ($\lambda$) y al factor de convección (h) respectivamente. La radiación que emite un cuerpo a una temperatura $T_1$ a otro que está a

temperatura $T_2$, será proporcional a la emisividad (ε), la constante de Stefan Boltzmann (σ) y el factor de vista del cuerpo 1 al 2 ($F_{12}$).

$$Q_{cond} = \lambda A (T_1 - T_2) \quad (1)$$

$$Q_{conv} = h A (T_1 - T_2) \quad (2)$$

$$Q_{rad} = \varepsilon \sigma F_{12} (T_1^4 - T_2^4) \quad (3)$$

Para completar el estudio que se quiere plantear basado en estos tres fenómenos principales de transferencia de calor, se considerará también la ecuación (4) que describe la radiación absorbida por una superficie dada ($I_{radAbs}$) función de la absortividad y la radiación incidente en dicha superficie ($I_{sol}$). Asimismo, a través de la ecuación (5) se describe la transferencia de calor en un intercambiador de calor ($Q_{Inter}$) relacionando la temperatura de salida ($T_{out}$) y de entrada ($T_{in}$) en el intercambiador con el caudal (ṁ) y el calor específico del fluido ($C_f$).

$$I_{radAbs} = \alpha I_{sol} \quad (4)$$

$$Q_{Inter} = \dot{m} C_f (T_{out} - T_{in}) \quad (5)$$

## 3.1. Factores principales en el diseño del elemento panel

El emplear un panel sándwich es una condición de contorno del desarrollo ya que la idea se ha concebido sobre la necesidad de buscar un diseño que busque complementar y desarrollar soluciones novedosas empleando la tecnología sándwich, tomando en consideración tanto el producto como el modo con el que se fabrican estos sistemas en la actualidad. Así las condiciones impuestas son las de aprovechar dos propiedades inherentes al acero como son su alta conductividad y ligereza en su aplicación como absorbedor de un colector solar térmico no vidriado, a la vez que se obtiene un beneficio del empleo del aislamiento térmico incorporado en la propia solución de panel industrializada.

Una vez se toma en consideración estas características del nuevo concepto a desarrollar, se han de valorar las ventajas y limitaciones de la tecnología del propio panel sándwich para incorporar un colector solar, tanto desde el punto de vista del rendimiento del producto como del proceso de producción. Así, al plantear los aspectos característicos del panel como solución que incorpora un colector solar, se va a proceder también a valorar los principales aspectos asociados a la producción del diseño que resultan de interés para la aplicación prevista. Para este análisis se va a considerar principalmente la aplicación de una fabricación de paneles en continuo que redunda en unos costes más competitivos, a pesar de tener mayores limitaciones en cuanto a flexibilidad de los diseños, frente al caso de la fabricación discontinua, que permite unos mayores niveles de personalización y adaptación a soluciones más variadas.

A pesar de esa limitación, uno de los aspectos beneficiosos de estos sistemas tan industrializados es el elevado nivel de definición, ya que cuentan con un amplio catálogo de detalles

constructivos, facilitando su aplicación en la conceptualización de los diseños de los edificios y de las obras de rehabilitación y permitiendo, de esta forma, resolver una amplia variedad de detalles constructivos, encuentros y acabados en obra.

Tomando todo lo expuesto en consideración, se propone un desarrollo del sistema basado en la solución más estandarizada y, por tanto, más empleada de panel sándwich: la que consiste en un panel con núcleo de poliuretano y dos caras metálicas, fabricado en continuo con un metro de ancho, espesor entre 60 y 120 mm y longitud variable hasta los 12 metros y un peso de entre 12 y 15 kg/m$^2$. En cualquier caso, esta consideración no excluye otros productos similares basados en el mismo concepto como pueden ser el empleo de una única chapa, metales alternativos para la chapa exterior como aluminio, acero inoxidable o cobre, núcleos de lana mineral, y otras alternativas que se adoptan también en el ámbito de las soluciones sándwich.

A modo de resumen, se puede considerar que las principales funciones que va a cumplir el sistema sándwich para la aplicación prevista serán:

- Es el elemento principal del colector desde un punto de vista constructivo. Es decir, es el panel que hace las veces de elemento de fachada y que, al combinarlo con un circuito hidráulico, va a convertir al panel sándwich pasivo en un elemento activo que toma la funcionalidad de colector solar térmico.
- Su cara exterior hace las veces del absorbedor, gracias a las buenas propiedades térmicas y ópticas del acero. Para resolver el absorbedor se podrá utilizar la chapa de acabado exterior del propio panel, o incorporar una tercera capa exterior metálica.
- Incorpora el aislamiento térmico en la cara opuesta al absorbedor lo que permite reducir las fugas y concentrar el calor en el absorbedor cuando el panel se convierte en un elemento activo. Asimismo, este aislamiento representa el aislamiento térmico de la fachada pasiva, tal y como vienen haciendo los sistemas que cuentan con aislamiento en la envolvente, en este caso a través del propio núcleo aislante del panel sándwich.

En los apartados presentados a continuación se van a detallar las implicaciones de cada componente del elemento constructivo panel sándwich, como son: el absorbedor, las chapas metálicas, el aislamiento y las dimensiones principales del panel.

### 3.1.1. El absorbedor

Para plantear el desarrollo del absorbedor se debe tomar en consideración la función principal de este elemento del colector: Capturar la máxima energía, retenerla y trasladarla al circuito hidráulico de la forma más eficiente posible para minimizar pérdidas de calor tanto hacia el exterior, como a través del propio panel en el proceso de trasvase entre colector y circuito hidráulico. Aquí, además de los aspectos asociados a la chapa metálica, la consideración del aislamiento térmico es un factor a tener en consideración en lo referente a la minimización de pérdidas en el proceso. Así, en este caso se va a comenzar valorando el absorbedor y posteriormente se estudiará el aislamiento en un apartado siguiente, para finalmente plantear una solución combinada en un concepto de panel.

En cualquier caso, el absorbedor tiene que estar ubicado en la zona del panel en contacto con el ambiente y que reciba la radiación solar, por lo que puede ser la cara exterior expuesta de un panel estándar que, además de cerrar el conjunto haga las funciones del absorbedor, o puede resolverse a través de una capa adicional, superpuesta a la exterior, que se incorpora al panel dejando en esta tercera capa la función de maximizar la absorción a esta chapa añadida.

Las funciones de capturar y retener la energía son las que hacen que el absorbedor sea un elemento singular del colector solar. Se trata por tanto de considerar las propiedades ópticas del acabado exterior: la absortividad y la emisividad. Específicamente:

- Se busca maximizar la absortividad (ecuación (4)) que representa la capacidad de la superficie para captar la mayor cantidad de radiación y por tanto de energía.
- Se busca minimizar la emisividad (ecuación (3)), para evitar que parte de la energía ganada gracias al efecto descrito en el punto anterior sea devuelta de nuevo al ambiente a medida que la temperatura del absorbedor aumenta. El efecto de la convección (ecuación (2)), también es mayor cuanto mayor sea la temperatura del absorbedor.

Valores típicos de estos parámetros para metales y otros materiales de referencia son los indicados a continuación en la Tabla 4. En los últimos años se han desarrollado recubrimientos y acabados selectivos para aplicaciones como la planteada, en las que se busca que la superficie optimice la relación entre estos dos factores. Una definición para esta relación es la que aporta Visa [174] como "*Spectral selectivity*".

| Material | Absortividad (α) | Emisividad (ε) |
|---|---|---|
| Acero Galvanizado | 0,7-0,9 | 0,2-0,3 |
| Acero pintado claro | 0,1-0,3 | 0,8-0,9 |
| Acero pintado oscuro | 0,8-0,95 | 0,7-0,95 |
| Acero Inoxidable pulido | 0,35 – 0,45 | 0,11 |
| Aluminio anodizado | 0,3 | 0,55 – 0,75 |
| Aluminio Pulido | 0,15 | 0,05 |
| Hormigón | 0,65 – 0,8 | 0,55 – 0,95 |
| Mármol Blanco | 0,4 – 0,45 | 0,95-0,97 |
| Ladrillo | 0,5 – 0,7 | 0,75 – 0,95 |
| Polímero – Plástico Blanco | 0,05-0,06 | 0,92 |
| Polímero – Plástico Oscuro | 0,9 | 0,9 |
| Recubrimientos selectivos | 0,88-0,96 | 0,1-0,2 |

**Tabla 4. Valores típicos de Absortividad y emisividad para diferentes materiales y acabados. [175] – [177]**

La conductividad también será otro factor determinante puesto que permite por un lado homogeneizar la temperatura en toda la superficie del plano del absorbedor y por otro, trasladar con una mayor eficiencia el calor desde este hacia el circuito hidráulico. En este caso el fenómeno de conducción (ecuación (1)) se aprovecha gracias a la conductividad y a la cantidad de material conductivo, por lo que el material y espesor de la chapa del absorbedor serán determinantes. Así, una chapa con una alta conductividad, suficiente espesor y una buena superficie de contacto entre sólidos, proporcionaría un buen fenómeno de conducción entre el

absorbedor y el circuito hidráulico. Sin embargo, una chapa de espesor elevado a la vez que favorece la conducción tiene ciertas limitaciones a la hora ser fabricada y, al mismo tiempo, implica un incremento de peso que puede tener un alto impacto en la solución planteada.

Por tanto, la conductividad del acero resulta un factor competitivo en este caso con valores de conducción elevados, situándose en el rango superior de la escala de conductividad de los materiales habitualmente empleados en construcción, siendo el cobre el material más conductivo a la vez que el poliuretano es el referente en el extremo opuesto (Tabla 5). Por otro lado, tal y como se ha descrito previamente, para el espesor serán interesantes aquellos que favorezcan la conducción sin que la solución se vea penalizada en peso y coste.

| Material | Conductividad λ (W/mK) |
|---|---|
| Cobre | 380 |
| Aluminio | 160 – 240 |
| Acero | 45 – 55 |
| Acero inoxidable | 17 |
| Hormigón armado | 2 – 2,50 |
| Fábrica de ladrillo hueco | 0,45 – 0,55 |
| Placa de yeso laminado | 0,25 |
| Policarbonato | 0,20 |
| Lana mineral | 0,031 – 0,05 |
| Poliuretano | 0,025 – 0,04 |
| Aerogel | 0,017 |

**Tabla 5. Conductividades para los materiales habitualmente empleados en construcción. [178] - [180]**

Finalmente, y, a modo de resumen, se enumeran a continuación los aspectos principales a valorar para la descripción del absorbedor y sobre los que se va a plantear el estudio de este elemento:

- Propiedades ópticas: Absortividad y Emisividad
- Propiedades físicas: Espesor y Peso
- Propiedades térmicas: Conductividad

### 3.1.2. Chapas metálicas

Las dos chapas metálicas que componen el panel sándwich son las que representan el cierre de este por sus dos caras y su función radica en contener el aislamiento entre ambas y dotar al conjunto de una rigidez y respuesta mecánica adecuada para el uso previsto, en este caso como solución de cerramiento. Dentro del concepto desarrollado, el absorbedor es también una chapa metálica, pero con una prestación, la de la absorción, añadida. Por lo tanto, las consideraciones para el absorbedor planteadas para las propiedades físicas y térmicas serán de aplicación para estos elementos también.

De esta forma, y en línea con lo descrito en el apartado anterior, se puede resumir que el conjunto cuenta con una serie de chapas metálicas, que una de ellas es el absorbedor, que el absorbedor puede ser una las dos chapas de cierre del panel, o que puede ser una tercera chapa que se superpone a la cara metálica exterior del panel. Las consideraciones de este apartado se centran en las chapas (una o dos según el caso) que no cuentan con la función del absorbedor.

Para ello el planteamiento a la hora de resolver las chapas está preestablecido en una solución con acero que se pliega en continuo como parte de la propia producción del panel. A este respecto cabe tomar en consideración que los procesos de conformado y plegado de la chapa se ven condicionados por el espesor y ancho de la bobina y que un incremento en el espesor de la chapa implica mayores costes de fabricación. Este aspecto es más crítico para la chapa que aloja el circuito hidráulico ya que requiere una geometría más compleja frente a la chapa opuesta que es en su primera concepción, plana, aunque también podría conformarse con unos pliegues, grecas, y formas específicas si esto implica algún tipo de ventaja. El proceso de producción es el que se ha representado en la Figura 22 del capítulo I.

En cualquier caso, la función principal de las chapas metálicas que no cuentan con la funcionalidad del absorbedor será la de favorecer la conducción del calor (ecuación (1)) hacia el circuito hidráulico. Cabe la posibilidad de resolver todas las capas con el mismo material, acero en este caso, o con una combinación de diferentes materiales, metales o no, pero se debe destacar que resulta necesaria una mínima compatibilidad entre todos esos materiales para resolver así el conjunto del panel pretendido. Lógicamente una solución que emplee el mismo material simplificará la solución, sin embargo, las ventajas de incorporar alguna variación podrían justificar otras alternativas.

Por tanto, los aspectos principales a valorar para la descripción de las chapas serán las mismas que para el absorbedor, pero sin contar con las propiedades ópticas:

- Propiedades físicas: Espesor y peso
- Propiedades térmicas: Conductividad

### 3.1.3. Aislamiento

Desde la perspectiva del comportamiento como colector solar, la función principal del aislamiento será la de evitar que el calor se pierda por la cara interior del panel para que la energía recogida se concentre en la zona de contacto entre el conducto y el absorbedor, buscando así una transmisión y aprovechamiento del calor más efectivas. Asimismo, y como parte del cerramiento del edificio, el aislamiento proporcionará también las prestaciones térmicas requeridas a las envolventes [179], en cuanto a tratar de minimizar el flujo de calor desde dentro del edificio hacia el exterior y viceversa.

Es decir, la consideración del aislamiento en una fachada activa implica una consideración doble, por un lado, se toman en consideración las exigencias térmicas para fachadas pasivas en cuanto a aislamiento térmico [180],[181], [182] que deben proporcionar a la envolvente y, por otro, el aislamiento debe contribuir a que el rendimiento del colector integrado sea el máximo posible. Estas dos consideraciones que, en la mayoría de los casos, serán compatibles, pueden tener unas aproximaciones diferentes en cuanto a la disposición, cantidad y tipo de material aislante que deberán ser evaluados adecuadamente.

En cualquier caso, para el presente estudio se adoptarán como pautas principales de diseño las necesidades vinculadas a la parte activa de la fachada como colector, puesto que es esta funcionalidad la principal en este caso, dejando los aspectos del aislamiento de la envolvente en un nivel de prioridad menor.

Por tanto, resultan de interés materiales aislantes con una conductividad térmica muy baja (ecuación (1)) y que se puedan adecuar a la geometría planteada que integre los conductos, de tal forma que se busque evitar la generación de cavidades por las que se puedan dar fugas de calor. De entre los materiales que habitualmente se emplean para fabricar los paneles sándwich el poliuretano es el material que mejor resuelve este aspecto gracias al proceso de inyección y espumado frente a la lana de roca o de vidrio para las que resulta necesario recortar y pegar la lana mediante adhesivos. Entre las ventajas que ofrecerían estos últimos están las prestaciones asociadas al material como pueden ser el aislamiento acústico o resistencia a fuego, pero que en este caso se consideran prestaciones en un segundo nivel de prioridad frente a la capacidad de aislamiento térmico. Las propiedades térmicas de estos materiales aislantes han quedado recogidas en la Tabla 5.

Así, los aspectos principales a valorar para la descripción del aislamiento serán equivalentes al caso de las chapas metálicas:

- Propiedades físicas: Espesor
- Propiedades térmicas: Conductividad

### 3.1.4. Dimensiones principales del panel y solución modular prevista

Para completar el análisis del diseño del panel como componente de la fachada activa, se deben analizar las implicaciones de este para conformar una solución completa desde el punto de vista del elemento constructivo que representará la solución en sus términos principales. Para ello resulta necesario valorar los aspectos asociados a las dimensiones principales del panel (largo, ancho y espesor) así como la influencia que estas dimensiones y modulación tienen en la interacción con el circuito hidráulico. La interacción entre panel y circuito hidráulico se va a tratar de forma detallada en el siguiente apartado 3.3.2.

De esta forma, el ancho del panel viene condicionado por el proceso de fabricación que está a su vez limitado por el ancho de bobina metálica que se emplea en el proceso de producción. Existe también una relación entre el número de conductos que se pueden disponer en el eje principal tal y como se describirá en el apartado 3.3.2. En función de cómo se defina lo solución combinada de chapas y conductos se puede valorar la influencia de la anchura del panel como parámetro de diseño, si bien en la mayor parte de los casos estará bastante acotado a dimensiones cercanas a 1 metro.

Para el espesor del panel se cuenta con el aislamiento y las chapas que cierran el sándwich (2 ó 3), por lo que esta dimensión vendrá principalmente condicionada por el espesor del material aislante que es del orden de 60 – 200 veces mayor que el espesor de las chapas.

Desde el punto de vista de la materialización, la longitud vendrá determinada tanto por las opciones de fabricación, transporte e instalación, así como por los requerimientos vinculados a la modulación de fachada dependiendo de si se disponen los paneles en posición vertical u horizontal. Por tanto, tomando en consideración las dimensiones principales se plantearán modulaciones asociadas a piezas que tendrán forma rectangular, un metro de espesor y una longitud variable de varios metros.

En el caso de una construcción terciaria o industrial, en donde se pueden encontrar grandes superficies sin huecos en la fachada, esta aplicación resulta muy ventajosa, pero cuando se

plantean casos de edificios residenciales, las ventanas, balcones y en general elementos singulares de la envolvente serán los que marquen la pauta de la modulación. A modo ilustrativo la siguiente Figura 43 representa el caso de una fachada residencial típica de un edificio en bloque de cinco alturas, en donde se diferencian las zonas en las que los huecos tienen influencia en la modulación (azul) y aquellas en las que se pueden plantear piezas de panel de mayores longitudes (verde) puesto que no se ven afectadas por los huecos.

Si en vez de piezas rectangulares, se plantean otras formas para los paneles como triangulares y trapezoidales [174] para cubrir esas zonas exentas, un ejemplo de integración de paneles es el que representa la Figura 42. En este caso, los elementos activos se disponen en las mismas zonas exentas que se han planteado en el caso anterior. No obstante, cabe destacar que en términos de simplicidad se considera que el empleo de pocos paneles redundará en beneficio del sistema. Por lo que, desde un punto de vista práctico, cubrir toda la superficie con un menor número de paneles que implican menos anclajes, conexiones, juntas y demás elementos asociados cada componente implicarán una menor complejidad de la solución.

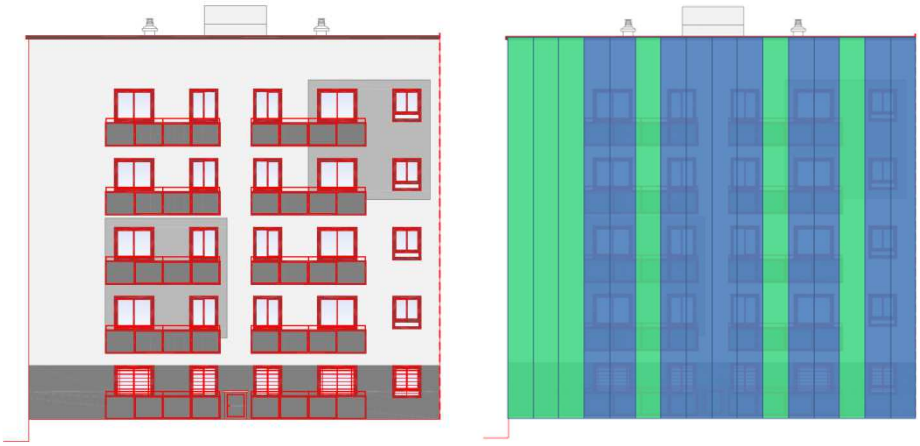


**Figura 41. Diferenciación de zonas en las que se pueden plantear paneles rectangulares de gran longitud (zona verde) en una fachada residencial y aquellas zonas en las que los huecos afectan a la modulación y a la longitud del panel (zona azul). [183]**

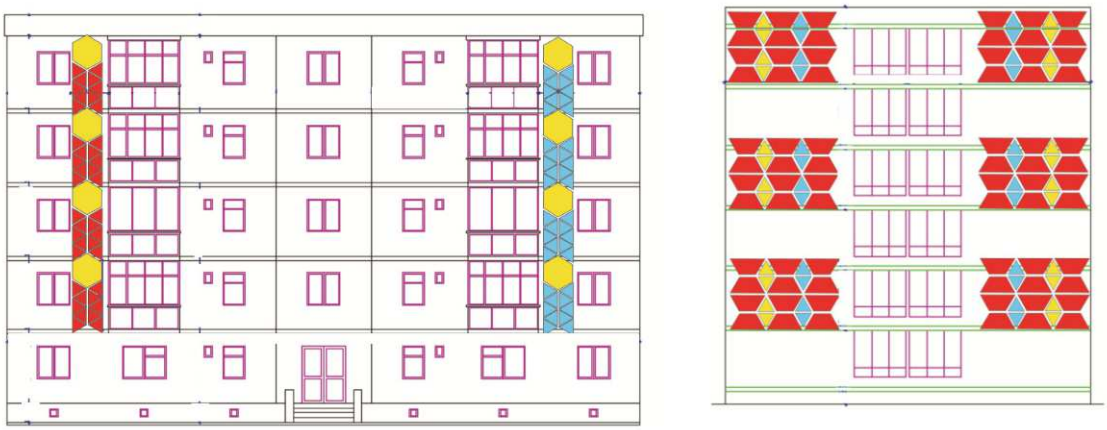


**Figura 42. Resolución de las zonas exentas de la fachada con paneles trapezoidales y triangulares. [174]**

Asimismo, y en relación con las dimensiones del conjunto en especial al espesor, cabe considerar la forma en la que se materializa el sistema de fachada en cuanto a si el panel se adhiere a otro muro soporte, o si es un elemento único que resuelve la envolvente. Siendo la segunda opción menos frecuente, cuando exista otro muro se planteará la posibilidad de un contacto directo entre panel y muro soporte (Figura 43 – derecha) o, lo más probable, una cámara de aire entre ambos (Figura 43 – izquierda) pudiendo ser esta ventilada o estanca en función de si queda abierta o no para facilitar el tiro del aire en la cara trasera del colector. Estas formas diferentes de resolver el sistema tendrán un efecto directo tanto en el rendimiento del colector como en el comportamiento térmico de la envolvente completa.

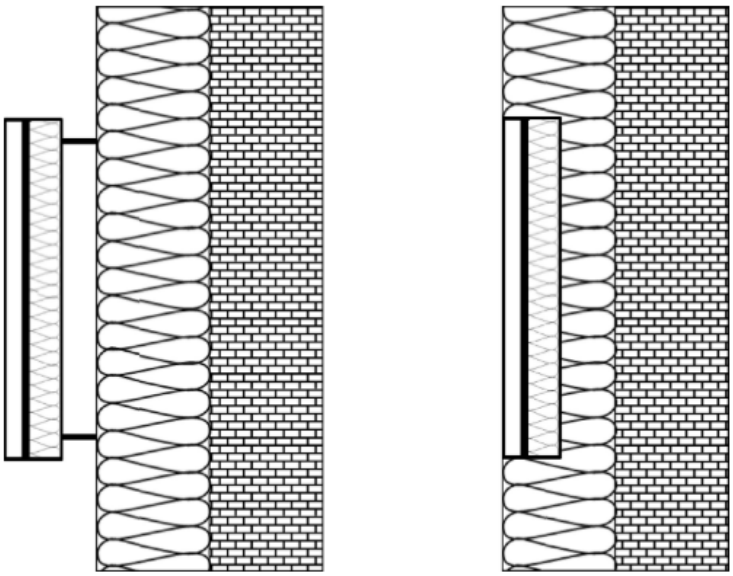


**Figura 43. Posición relativa entre colector solar integrado en fachada. Disposición superpuesta generando una cámara de aire entre panel y muro (izquierda) o enrasada con el plano de la fachada (derecha). [184]**

De forma similar, para la integración efectiva del panel, al tratarse de un sistema que se va a emplear para resolver fachadas, tendrá otra serie de componentes como los remates, las juntas o el sistema de anclaje que también se deberán resolver para obtener una solución completa de fachada. Puesto que en principio estos aspectos no tienen una relación directa con el comportamiento y rendimiento como colector solar térmico, no se van a considerar en detalle en el presente estudio y se valorarán únicamente los parámetros de diseño que inciden en el comportamiento térmico de la solución.

De cara a valorar los factores que afectan al comportamiento del panel como colector solar, los principales serán aquellos que afecten al comportamiento térmico en cuanto a la capacidad de aislamiento y de transferencia de calor que se han indicado en los apartados previos referidos a las chapas y el material aislante. No obstante, existe una gran interdependencia entre el panel y el circuito hidráulico, aspecto que será analizado más en detalle en el apartado 3.3 una vez se hayan descrito ambos elementos. En este caso, y como paso previo a considerar el conjunto

completo, en lo que al panel como elemento constructivo se refiere los aspectos a valorar para su descripción serán fundamentalmente parámetros geométricos. Es decir:

- Parámetros geométricos: Longitud, anchura y espesor.
- Factores de diseño en la integración: Disposición relativa en el plano de fachada y generación de cámara de aire

## 3.2. Factores principales en el diseño del circuito hidráulico

La relevancia del sistema hidráulico es uno de los aspectos clave en el desarrollo de una solución como la planteada puesto que es este elemento el que convierte a la fachada en un concepto activo, trasladando el calor absorbido en la piel exterior, que hace las veces de absorbedor, hasta un sistema de almacenamiento térmico interior, con el fin de aprovechar al máximo la energía solar recogida.

La función principal que debe cubrir este circuito hidráulico integrado en el colector es la de transportar la energía térmica que se acumula en el absorbedor y trasladar la mayor cantidad de esta de la forma más eficiente. Se trata por tanto de un comportamiento análogo al de un intercambiador de calor (ecuación (5)).

El circuito hidráulico completo se complementa con la conexión de los paneles hasta el tanque de almacenamiento a través de los conductos de distribución. Tanto el tanque de almacenamiento como los conductos de distribución serán analizados posteriormente en el apartado 3.3.3, quedando en la presente sección 3.2 el análisis de los tubos embebidos en el panel, las conexiones entre los mismos, así como las posibles combinaciones entre circuitos para configurar baterías de colectores.

Por tanto, se puede concluir que la función de intercambio energético entre conductos y absorbedor supone el aspecto más significativo del diseño que se va a plantear a continuación, función que se debe maximizar para alcanzar rendimientos competitivos. Por ello, se plantea un análisis de los siguientes componentes para configurar el circuito embebido y que serán desgranados en los apartados que vienen a continuación:

- El conducto longitudinal: Es el tubo por el que circula el fluido calor portador al que el absorbedor transfiere el calor captado.
- Conexionado entre conductos y entre paneles: Diferentes configuraciones de conexionado proporcionarán soluciones alternativas para el diseño del circuito.
- Caudal: Parámetro que determinará la cantidad de fluido que circula por el circuito y por tanto la cantidad de energía que se recoge.
- El fluido calor portador: El calor se recoge y transfiere por el sistema a través de este.

### 3.2.1. Conductos longitudinales

Para describir los parámetros que definen el tubo principal del circuito hidráulico se debe valorar, por un lado, el tipo de material empleado y la propiedad conductiva del mismo y, por otro, la geometría empleada expresada en diámetro (asumiendo que sea de sección circular) y

espesor de pared. Tal y como se describirá en el apartado 3.3.1, el tubo puede conformarse con el mismo material del absorbedor generando una solución híbrida o puede ser un elemento adicional al absorbedor que se une al mismo para generar el colector. Los aspectos planteados en este apartado están referidos al segundo caso con un conducto independiente del colector.

Entre los materiales a emplear, tradicionalmente los conductos para aplicaciones domésticas se resolvían con metales como el cobre, el acero o el plomo. Frente a estos, los sistemas fueron evolucionando, descartando aquellos que tenían afección a la salud como el plomo o el fibrocemento y se potenció de forma significativa sistemas hidráulicos para distribución de calor en edificación basados en materiales poliméricos y plásticos, más económicos que los metales, como el polietileno, polipropileno, polibutileno, PVC, poliamida (nylon), teflón, o sistemas mixtos (multicapa).

Lo cierto es que para los materiales poliméricos existe una amplia variedad de soluciones y fruto de los desarrollos en la ingeniería de materiales y de los plásticos en concreto, también se pueden encontrar algunos plásticos con conductividad más elevada [185]. Productos como CoolPoly® [186] o Thermatec™ [187] se emplean actualmente en aplicaciones como los componentes electrónicos, el transporte o la aeronáutica.

En cualquier caso, las compatibilidades entre materiales son aspectos para tener en consideración al platear soluciones. En el caso de los metales, un factor determinante será el efecto del par galvánico entre metales y se deberá prestar atención al metal del tubo y a su compatibilidad con el acero del absorbedor y del metal presente en el panel en general. Por otro lado, la compatibilidad química entre el material del tubo y la composición de la mezcla del fluido calor portador será aspecto importante, siendo en general más determinante para el caso de los plásticos. En todos los casos la compatibilidad dimensional asociada a las dilataciones térmicas deberá ser analizado para los saltos térmicos previstos, siendo en general mayores para los metales que para los plásticos.

A modo de extensión, frente a la tabla de materiales presentada para las chapas y el absorbedor, (Tabla 5), la siguiente Tabla 6 muestra la conductividad térmica de los principales materiales empleados para sistemas de tuberías de distribución de calor a escala residencial. De forma similar al caso del absorbedor, se presentan dos grandes familias de materiales: metales y plásticos. En este caso además de los ya citados cobre y acero, se presenta una amplia variedad de alternativas derivados de las diferentes opciones y formulaciones basadas en materiales plásticos que permiten materializar estos circuitos.

| **Material** | **Conductividad λ (W/mK)** |
|---|---|
| Cobre | 380 |
| Acero | 45 – 55 |
| Nylon (poliamida) / Teflón | 0,25 |
| Polietileno reticulado – PEX | 0,35 -0,38 |
| Polietileno de alta densidad - PEHD | 0,45-0,52 |
| Polipropileno | 0,22 - 0,38 |
| PVC | 0,18 - 0,19 |
| Plástico conductivo (Elastómero) | 1 - 3 |
| Plástico conductivo (Coolplay® - D Series) | 1 - 10 |

**Tabla 6. Conductividades de los principales materiales empleados para conductos. [186] – [189]**

Por otro lado, la rigidez del material ofrecerá soluciones flexibles para la mayoría de los materiales plásticos y rígido para los plásticos no flexibles y para los metales. La rigidez es un aspecto importante como parte de la integración en cuanto a que un conducto demasiado rígido requerirá de una solución más específica y precisa que un sistema más flexible que se puede adaptar mejor a diferentes geometrías dentro de unos límites y tolerancias menos estrictas. Asimismo, la generación de zonas curvas resultará, a priori, más sencilla en el caso de soluciones con menor rigidez.

En cuanto al diámetro interior y pared del tubo, son factores que vienen limitados por las posibilidades de fabricación de estos conductos principalmente a las tecnologías de producción asociadas al material empleado. Un tubo con una pared delgada favorecerá en general la conducción y el intercambio de calor. La incidencia de la sección no resulta tan evidente, si bien secciones muy pequeñas pueden dificultar el proceso conducción de calor hasta el fluido y de éste a través del conducto, parece lógico suponer que una sección excesiva tampoco será favorable. En cualquier caso, el interés entre la sección disponible y el caudal del fluido determinarán la cantidad y capacidad de intercambio energético frente a la resistencia hidráulica del conducto y la energía necesaria para hacer circular el fluido, aspecto asociado al consumo eléctrico cuando se cuenta con una bomba de circulación.

En lo referente a los conductos, se puede concluir que las dimensiones para el diámetro y sección de pared de tubo vendrán determinadas de acuerdo con las geometrías comúnmente empleadas en soluciones de este tipo de aplicaciones, como circuitos de agua en aplicación residencial y elementos de conducción para colectores solares. Se pueden considerar que valores entre 5 y 20 mm para el diámetro y 0,5 – 3 mm de espesor de tubo son valores típicos en este caso.

Por tanto y a modo de resumen, los aspectos principales a valorar para la descripción de los conductos serán:

- Propiedades térmicas: Conductividad
- Propiedades físicas: Diámetro y Espesor de pared

### 3.2.2. Configuración Circuito hidráulico

Una vez se cuenta con un diseño específico en cuanto al conducto, considerando la geometría y el tipo de material, el siguiente paso en el diseño es plantear la configuración del circuito dentro del panel con un esquema hidráulico, definiendo el número de conductos y la forma en la que estos se conectarán para formar el circuito hidráulico. Para ello, se deberá hacer un ajuste dimensional de los conductos que se pretenden incorporar dentro del área activa determinada por el panel. En una escala mayor se plantea la forma de conectar varios paneles para resolver el campo solar completo que se vinculará al edificio a través de la fachada.

Dentro del panel existen dos soluciones típicas para resolver el circuito: en paralelo o en serie (serpentín), aunque combinando ambas también cabe la posibilidad de configurar esquemas más sofisticados, el esquema se reduce en la mayoría de los casos a una combinación de estos dos tipos básicos de conexión.

Resolver el circuito hidráulico con un esquema en paralelo se presta a ser más fácilmente industrializado, puesto que se resuelve con un eje principal para conexionar a continuación los tubos paralelos con un colector perpendicular en la entrada y otro en la salida. El esquema en serpentín también se puede resolver de manera industrial si bien el proceso de ejecución puede resultar más complejo, específicamente por la exigencia en la resolución de los radios de curvatura necesarios cada cierta distancia y la elevada precisión requerida para fabricar piezas discretas, más acorde un proceso discontinuo que con uno continuo.

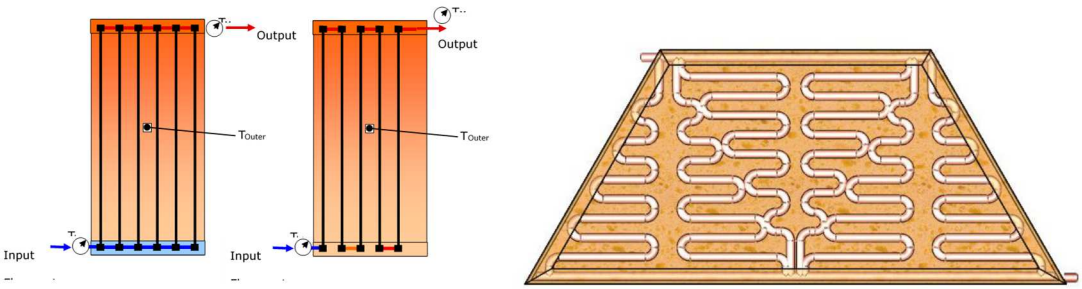



**Figura 44. Diversas formas de resolver el circuito hidráulico del panel a través de la combinación de los esquemas básicos en paralelo(izquierda), en serpentín (centro) y solución combinadas más complejas (derecha) [174]**

Para un sistema basado en un panel sándwich como el que se está planteando, un circuito en paralelo con el eje principal coincidente con el del panel resulta ser el sistema que, a priori, cuenta con mayores ventajas en cuanto a su producción puesto que la sección del panel integrando los conductos se mantiene constante, permitiendo ajustar el panel a la longitud deseada para a continuación incorporar los colectores de conexión perpendiculares como accesorios con los que configurar el circuito. Aunque este esquema también podría ajustarse al caso del serpentín, el conector curvo puede suponer una dificultad añadida. En cualquier caso, resulta de interés analizar la ventaja en términos de rendimiento energético que podría ofrecer una solución en serpentín a costa de una producción más laboriosa.

Tanto para la solución en paralelo como en serpentín, la distancia entre conductos paralelos supone otro de los parámetros necesarios para el diseño. Una distancia muy elevada entre conductos implicará que el calor del absorbedor no se capta completamente en el circuito hidráulico, originando pérdidas energéticas, mientras que conductos demasiado cercanos requerirán de un reparto de calor entre los mismos con lo que el fenómeno de transmisión al fluido podrá estar también menos optimizado.

Finalmente, en el diseño del circuito hidráulico cabe tomar en consideración la modulación que se aplicará al mismo y si se plantea una modulación y tamaño del circuito acorde con la modulación aplicada al panel o si por el contrario se requieren varios paneles para configurar el circuito. En el apartado 3.3.2, se planteará este aspecto como parte de la integración de todos los componentes en un concepto de panel modular.

A modo de resumen los aspectos fundamentales a valorar para la configuración del circuito hidráulico serán:

- Tipo de conexión: Serpentín o paralelo

- Parámetros geométricos: Distancia entre tubos paralelos

### 3.2.3. Caudal

El caudal supone la cantidad de fluido que por unidad de tiempo circula a través del colector y, por tanto, es proporcional a la cantidad de energía que se puede recoger y transportar a través del sistema. El efecto de la energía intercambiada es directamente proporcional al caudal (ecuación (5)). A diferencia del resto de factores asociados al circuito hidráulico descritos en los puntos anteriores, que una vez definido el diseño no se pueden modificar, el caudal es un parámetro regulable a través del sistema de impulsión y distribución del circuito.

El objetivo será por tanto buscar un caudal óptimo para el diseño propuesto, siendo esta optimización función del objetivo pretendido: puede ser óptimo en términos de máximo rendimiento o máxima temperatura. En cualquier caso, será deseable contar con un sistema suficientemente flexible para proporcionar un rango variable de caudales que permitan ajustar este factor durante la propia operación del sistema.

### 3.2.4. Fluido

La relación entre el circuito hidráulico y el tipo de fluido calor portador es también directa, puesto que será la capacidad calorífica de este la que determine el potencial del intercambio de calor (ecuación (5)). Al igual que en el caso del caudal es un aspecto que puede ser modificado sin necesidad de adaptar el diseño, aunque en general supondrá mayores complicaciones que variar el caudal cuando se emplee una bomba con regulación de velocidad.

Así, la sección del tubo el caudal y el tipo de fluido son tres factores que tienen una relación de dependencia. Esto implica que sea necesaria una compatibilidad química entre conducto y mezcla para evitar que el fluido deteriore o afecta al material que compone el tubo y viceversa.

En sistemas de colectores solares resulta habitual emplear mezclas de agua y glicol o alcohol para reducir el punto de congelación, de forma similar al caso de los sistemas geotérmicos. Pero el interés en controlar el punto de congelación no está únicamente vinculado a las condiciones exteriores o del terreno ya que cuando se emplean bombas de calor como en la principal aplicación contemplada para el sistema propuesto, el calor absorbido por la bomba de calor puede suponer grandes reducciones de temperatura en el circuito primario al que se pretende conectar el sistema de colectores solares.

El empleo de mezclas de agua y otros compuestos implica también una modificación de densidad y calor específico y por tanto de las características del fluido calor portador [190]. La siguiente Tabla 7 muestra diferentes soluciones de mezcla para diferentes temperaturas de funcionamiento.

| Brine | Freezing point (°C) | Thermal conductivity (W/m·K) | Specific heat capacity (J/kg·K) | Density (kg/m$^3$) | Dynamic viscosity (mPa·s) | Kinematic viscosity (mm$^2$/s) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Propylene-glycol 25% at 0°C | -10 | 0,450 | 3974 | 1026 | 5.51 | 5.37 |
| Propylene-glycol 25% at 40°C | -10 | 0,486 | 3991 | 1010 | 1.37 | 1.35 |
| Propylene-glycol 33% at 0°C | -15 | 0,416 | 3850 | 1035 | 8.17 | 7.90 |
| Propylene-glycol 33% at 40°C | -15 | 0,445 | 3899 | 1015 | 1.74 | 1.72 |
| Ethanol 24.4% at 0°C | -15 | 0,426 | 4288 | 972 | 5.85 | 6.02 |
| Ethanol 30% at 0°C | -20 | 0,399 | 4170 | 966 | 6.49 | 6.72 |
| VegoCool mixed at 0°C | -15 | 0,436 | 3320 | 1106 | 9.5 | 8.6 |
| VegoCool mixed at 40°C | -15 | 0,488 | 3510 | 1090 | 2.5 | 2.3 |

**Tabla 7. Diferentes mezclas para el fluido calor portador para aplicaciones geotérmicas. [191]**

Finalmente, la viscosidad de la mezcla es un aspecto también a valorar, puesto que una mayor viscosidad implica una mayor energía necesaria para bombear el fluido y un mayor consumo eléctrico de la bomba de circulación.

- Tipo de fluido y propiedades: Conductividad, densidad, calor específico y viscosidad.

## 3.3. Solución combinada de panel y circuito hidráulico

Dotar al panel sándwich de acero de un circuito hidráulico es probablemente el principal reto del desarrollo del panel activo, puesto que supone la incorporación de un sistema con un cierto grado de complejidad a un producto que antes no contaba con estos elementos y que, por tanto, debe adaptar su diseño para alojar los conductos, prever conexiones, aislar los conductos y en general plantear las necesidades de un circuito hidráulico en cuanto a comportamiento, mantenimiento etc. Asimismo, resulta necesario tener muy presente, que el conjunto debe ser capaz de obtener una energía y un rendimiento térmico satisfactorios como colector solar térmico, sin que las propiedades que ya ofrecía como solución de fachada se vean mermadas.

Se han analizado en los apartados anteriores los aspectos asociados al panel por un lado y al circuito por otro. Pero para resolver la fachada activa resulta necesario analizar el conjunto y las implicaciones de un producto que combine ambos elementos. Esto implica que se van a dar interacciones importantes entre ambos elementos principales, por lo que el diseño de la solución debe proporcionar un equilibrio necesario que resulte ser el esperado para el sistema para que, en definitiva, se comporte como una fachada solar activa.

De esta forma, los aspectos principales a considerar y que se describirán en mayor profundidad en los próximos apartados, serán:

- Posición relativa del sistema hidráulico y de los conductos frente al absorbedor. Afecta principalmente a los contactos que se generan en el eje que determina la "profundidad" del conducto en la dirección perpendicular al absorbedor. Se trata por tanto de favorecer el fenómeno de conducción entre el absorbedor y la pared del tubo (ecuación (1)).
- Interacción entre circuito completo y el panel en cuanto a dimensiones principales. Se analizan en este caso la longitud y anchura del panel en y se valora como se resuelve el sistema combinado.
- Circuito solar completo contemplando el resto de los componentes. Se analizan los elementos necesarios para resolver un circuito solar capar de captar, distribuir y almacenar la energía térmica.

### 3.3.1. Posición relativa del conducto frente al absorbedor

Para valorar la posición del tubo se plantean dos alternativas; generar un conducto con el mismo material que compone el absorbedor o unir físicamente dos componentes el conducto y el absorbedor. El análisis de la sección combinada (absorbedor + tubo) resulta muy interesante para materiales con conductividades altas como es el caso de los metales y permite generar diversas geometrías a medida.

Sin embargo, la materialización de un absorbedor y un conducto combinado es un aspecto completamente ligado al proceso de fabricación. A este respecto resulta ilustrativa la Figura 45 en la que se muestran detalles de una patente que protege un proceso de producción de paneles solares. Tal y como se aprecia en los esquemas presentados, se describe cómo generar de forma conjunta el absorbedor junto con el circuito hidráulico a través de la unión de chapas metálicas y se pone de manifiesto que esta fabricación combinada requiere de un proceso de producción específico.

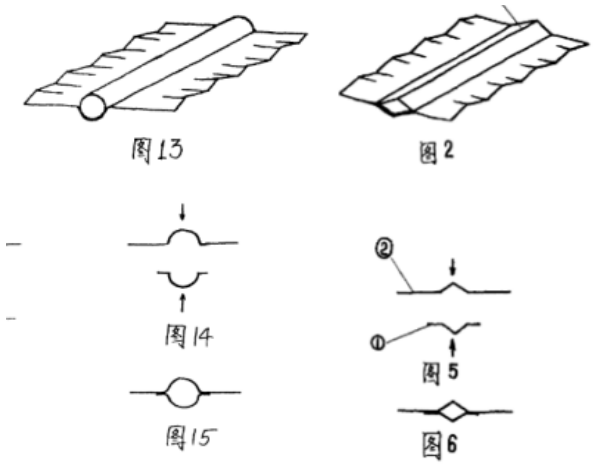



**Figura 45. Alternativas para generar de forma combinada el conjunto absorbedor, conducto a través de la unión de dos chapas para formar una sección circular (izquierda) o cuadrada. Patente CN1073381 (A) (1991). [192]**

Existe algunas experiencias en el ámbito del aluminio gracias al proceso de roll-bonding en el que, a través de este proceso directamente asociado a este material, se generan las conducciones dentro del panel. En la bibliografía se encuentran algunos ejemplos de este estilo para paneles [171], [193], [194].

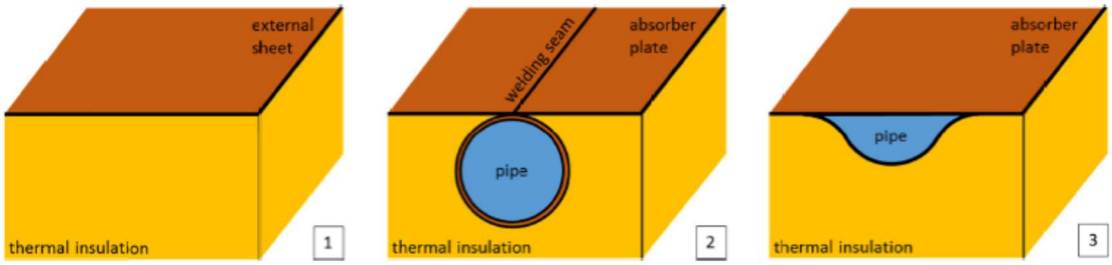



**Figura 46. Generación del conducto mediante el proceso de roll-bonding (derecha), frente a una alternativa soldada (centro) y un panel sin conducto (izquierda). [193].**

Otra alternativa es la de emplear otro proceso muy habitual con este material, la extrusión, en el que se fabrican de forma conjunta tanto el absorbedor como para el conducto. El sistema Triplesolar [195], bajo el que se comercializa una patente asociada [196], es un ejemplo de esta asociación entre proceso y producto, para un sistema que emplea aluminio.

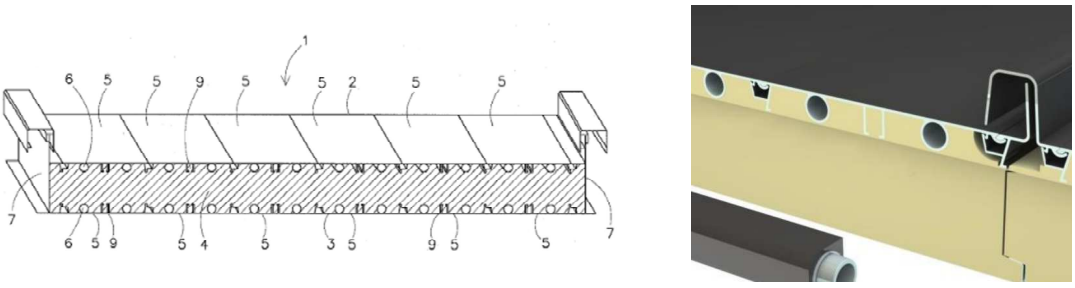


**Figura 47. Extrusión conjunta de chapa y conducto en aluminio. Patentes NL2003120 (C) (izquierda) [196], y Triplesolar (derecha). [195]**

Otra alternativa en la que se combina en un único perfil extruido la superficie exterior del absorbedor junto con el conducto integrado del circuito hidráulico es la descrita en la Figura 48. En este caso, la cara interior del tubo se diseña con una serie de aletas que aumenten la superficie de contacto entra el tubo y el fluido, favoreciendo así el proceso de intercambio de calor.

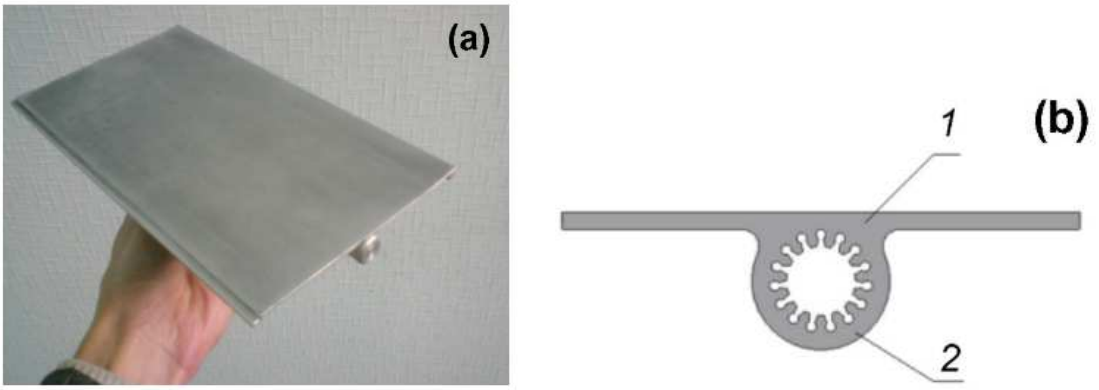



**Figura 48. Solución de una única pieza que combina la chapa y el conducto fabricada por extrusión en aluminio. [197]**

Las geometrías propuestas por las soluciones en aluminio suponen un nivel de complejidad muy elevado para ser fabricados en acero, ya que se dan una serie de limitaciones asociadas a la fabricación y la tecnología de chapa plegada en frío que hacen inviable económicamente replicar los diseños en aluminio con una solución en acero como la que se está considerando. De las alternativas presentadas, únicamente la tipología descrita en la Figura 45. podría tener una aplicación al caso de las chapas del sistema sándwich. Sin embargo, la incorporación del proceso de unión (mediante soldadura o adhesivos) a la producción en línea del sándwich implica elevar significativamente el nivel de complejidad de la fabricación. Por lo tanto, se descartan estos conceptos de fabricación combinando conducto y absorbedor para la aplicación que se está planteando en la presente tesis.

Así, para el desarrollo propuesto se va a plantear un conducto cuya posición relativa frente al absorbedor sea tal que, por un lado, quede oculto por motivos de acabado y diseño arquitectónico de la fachada y, por otro, busque una amplia superficie de contacto para favorecer el fenómeno de conducción entre absorbedor y conducto.

La superficie de contacto entre ambos componentes (tubo y chapa) es un aspecto clave y completamente asociado al diseño que se adopte, así como la conductividad y tipo de material. Una superficie de contacto limitada reducirá la transmisión de calor (ecuación (1)) mientras que una superficie mayor lo favorecerá. Asimismo, en la cara posterior y opuesta al contacto resulta de interés incluir un aislamiento térmico elevado, con el fin de evitar pérdidas de calor hacia el interior del colector, concentrándolo en la superficie de contacto entre el absorbedor y el tubo y buscando así un proceso de intercambio de calor más efectivo.

La Figura 49 muestra diferentes alternativas de contacto entre una única chapa y un conducto, variando desde un contacto lineal, a una mayor superficie de contacto a través de diseños adaptados. Además, las implicaciones en cuanto al aspecto estético es un factor a tener en

cuenta puesto que, para el caso de la soldadura y el curvado de chapa, la unión de ambos elementos se podrá apreciar por la cara expuesta de la chapa, mientras que, con las otras dos alternativas, esa unión quedará oculta.

**Figura 49. Sistema resuelto mediante una chapa y un tubo. Generación de superficie de contacto lineal por soldadura ultrasónica (Izquierda). Alternativas con adhesivo a la derecha. Contacto lineal (derecha superior), mayor superficie de contacto a través del curvado de la chapa (derecha centro) y adaptación de la geometría de tubo para generar más contacto sin curvar la chapa (derecha inferior). [198], [199]**

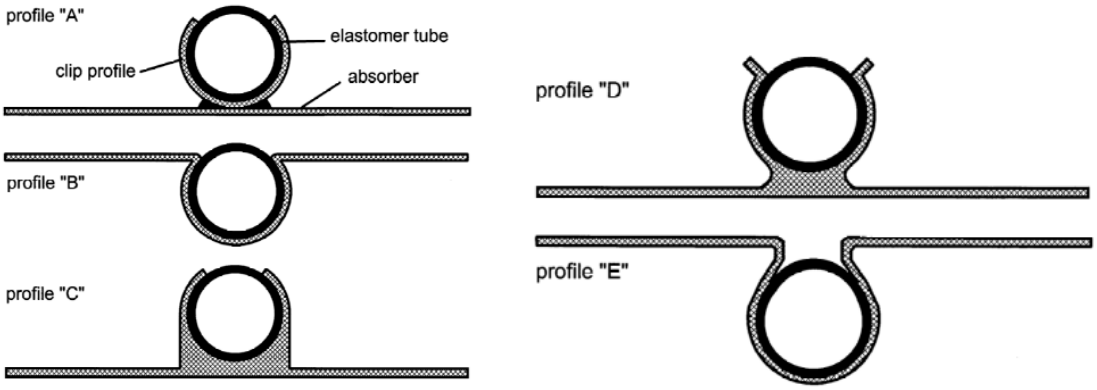



**Figura 50. Diferentes conceptos para resolver una solución que combina absorbedor de aluminio con conducto plástico elastómero. [200]**

Cuando se adopta una solución que combine el conducto y la chapa del absorbedor, de nuevo, el caso y las posibilidades que ofrecen la tecnología del aluminio extruido sirve de inspiración para valorar alternativas. Así se pueden plantear conceptos similares a los planteados en la Figura 49 presentada anteriormente. Dejando la solución del conducto en una sección circular estándar, cabe la posibilidad de resolver la chapa y el contacto con el tubo de diversas y variadas formas, tal y como se presenta en la Figura 50.

Como alternativa a la combinación de una sola chapa y tubo, cabe la alternativa de generar un "desdoble" de chapa con el fin de obtener mayores superficies de contacto. Este tipo de solución únicamente se puede conseguir con elementos maleables como las chapas metálicas y no se puede considerar en otras soluciones como por ejemplo un panel de hormigón. Los esquemas

planteados en la Figura 51 representan este caso en donde se propone una segunda chapa por el interior que “envuelve” el tubo. Esta composición requiere también que exista la chapa exterior continua y lisa, que oculte el circuito hidráulico y que funcione como absorbedor. En cuanto a la chapa interior, esta podrá cubrir de forma parcial el panel en aquellas zonas en las que exista el tubo, o toda la cara posterior de la chapa exterior.

Esto implica que, en línea con este aspecto de diseño, así como con lo comentado en los apartados 3.1.1 y 3.1.2, en función de la forma en la que se resuelva el conjunto absorbedor + chapa serán necesarias en la cara exterior una o dos chapas según el caso adoptado.

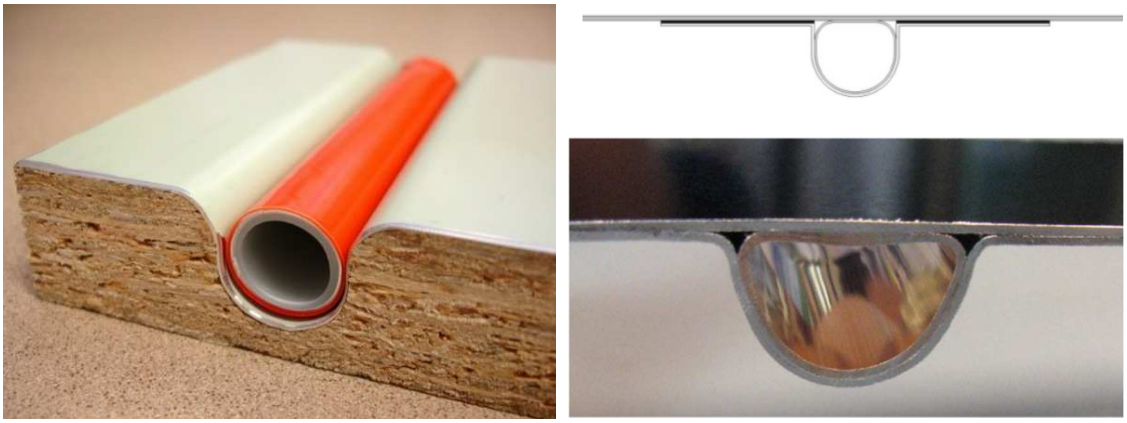


**Figura 51. Solución alternativa para obtener un mayor contacto a través de un desdoble de la chapa para generar el espacio para alojar el conducto (Izquierda). [201]. Alternativas mediante adhesivos (derecha superior) [199] y pegado mediante presión (derecha inferior) a la cara posterior del absorbedor (abajo derecha). [198]**

Se puede, por tanto, concluir que, en lo referente a la posición relativa del conducto frente al absorbedor, cuando se considera un planteamiento basado en acero y chapa plegada como es el propuesto, caben tres alternativas principales. La Tabla 8 muestra a modo resumido estas 3 alternativas con los aspectos más destacables de estos conceptos en los que, en todos los casos, cabe la posibilidad de plantear alternativas en las que se aprecie el tubo y/o la unión por la cara vista, así como geometrías alternativas a la forma circular para resolver la sección del conducto.

Cabe destacar que, cuando el absorbedor se conforma con una lámina metálica o similar, esta se resuelve en una capa de poco espesor y que, frente a las dimensiones de sección de tubo, se debe establecer una relación dimensional adecuada entre ambos elementos: absorbedor y tubo.

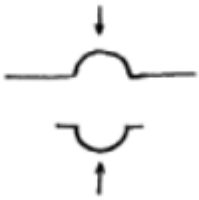
| Alternativa | Esquema | Componentes | Comentarios |
|---|---|---|---|
| **Tubo generado conjuntamente con el absorbedor** |  | Chapa principal con forma en semicírculo y elementos en forma de chapa para generar el conducto al combinarlas | Solución con un único material. Amplia superficie de contacto. La unión de ambas piezas debe garantizar la estanqueidad del conducto. |
| **Chapa combinada con Tubo** | | Una chapa y un Tubo | A priori chapa y tubo del mismo material, aunque se pueden plantear combinaciones. En función de la geometría del tubo se generará un contacto lineal (circulo) o con mayor superficie (cara plana). En caso de ser adherida, la conductividad del adhesivo tendrá un gran impacto. |
| **Desdoble de chapa** | | Dos chapas y un tubo | Mayor flexibilidad para plantear materiales alternativos, principalmente para el tubo, no tanto para las chapas. Amplia superficie de contacto. |

**Tabla 8. Alternativas para resolver el conjunto absorbedor + tubo**

### 3.3.2. Interacción entre el circuito hidráulico y el panel

Además de la posición relativa entre el conducto y el absorbedor se debe analizar la interacción que existe entre el circuito hidráulico y el panel. Esto se relaciona con las principales dimensiones del panel expresadas en longitud, anchura y espesor.

Para el espesor, de acuerdo con lo descrito en el apartado anterior, el circuito hidráulico "se incorpora" dentro conjunto del panel que se compone de chapas y aislamiento. De esta forma el circuito queda embebido entre la chapa (o chapas) exterior y el aislamiento, siendo la dimensión de este último la más significativa. En términos geométricos y dimensionales la interacción entre ambos resulta en general pequeño, salvo que se cuente con un absorbedor y/o aislamiento de muy poco espesor combinado con un conducto de diámetro en el rango superior. La relación entre el diámetro del tubo y el espesor del aislamiento determinará el grado de influencia que en la mayoría de los casos se estima que sea poco significativo.

Para las otras dos dimensiones, longitud y anchura, se plantean diferentes alternativas en función de cómo se materialice el trazado hidráulico. En términos generales se pueden considerar dos variaciones en función de si la disposición de los tubos paralelos coincide con el eje principal del panel, así como en el tipo de conexión en serpentín o en paralelo. Las cuatro combinaciones resultantes de estas alternativas es la que se presenta en la Figura 52.

En esta figura se pone de manifiesto también la diferencia entre resolver los elementos de conexionado entre tubos, dentro (figuras de la derecha), o fuera del panel (figuras de la izquierda). Por otro lado, la disposición del panel en el plano de fachada tendrá también una serie de implicaciones asociadas al comportamiento hidráulico, principalmente a las necesidades de bombeo en vertical. El caso representado en la Figura 52 es el de un panel dispuesto en posición vertical en su eje principal, pero que podría haber sido dispuesto en una posición horizontal equivalente.

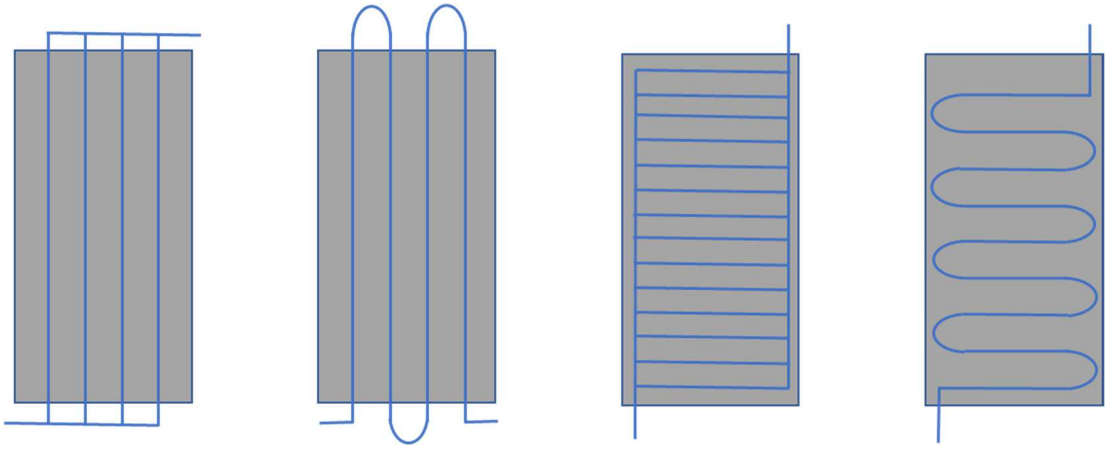


**Figura 52. Relación dimensional entre panel y circuito hidráulico para conexiones en serie y en paralelo**

En términos generales, la interacción analizada consiste en aspectos asociados a la relación dimensional y de modulación entre las geometrías principales tanto del panel como del circuito. Así, se deberá plantear la relación entre la superficie del panel y su interacción con el circuito.

Desde un punto de vista del análisis térmico como colector, se puede representar el conjunto a través de una sección o porción equivalente. Cuando se trata de un sistema en serpentín se puede hacer el símil de un panel prismático de sección continua y longitud equivalente tal y como desarrolló O'hegarty [202]. Por otro lado, para un circuito en paralelo se puede definir de forma similar una sección equivalente entre dos tubos paralelos siendo el ancho de la porción la que determine la distancia entre dos tubos.

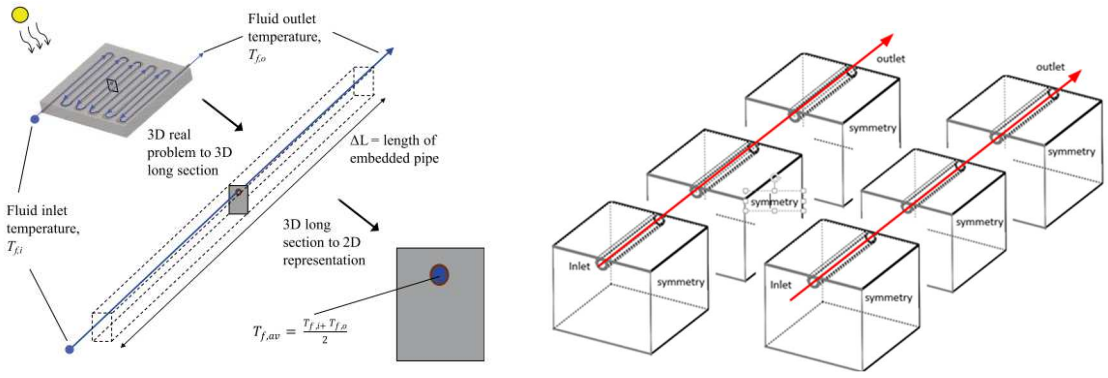



**Figura 53. Sección equivalente representativa para un circuito en serpentín (izquierda) [202] y en paralelo (derecha)**

Por tanto, se concluye que, en ambos casos, se puede representar el conjunto panel circuito como una sección equivalente con una longitud equivalente y un área del absorbedor que tiene una afección sobre el conducto.

Resulta importante el diseño y relación entre la superficie del absorbedor del panel y el circuito hidráulico ya que una amplia superficie de panel tendrá una implicación en el rendimiento energético de la solución. En términos generales a mayor superficie se obtendrá un mayor intercambio entre el panel y el fluido, pero las pérdidas asociadas a las temperaturas más elevadas que se alcanzan también tendrán una incidencia a considerar [203], [204].

### 3.3.3. Circuito solar completo con depósito de almacenamiento térmico

La fachada activa planteada como un colector térmico, resulta ser una pieza clave del sistema solar y se ha analizado de forma individualizada debido al interés que tiene la integración que se pretende, como aspecto fundamental con el que plantear una fachada solar. Sin embargo, la fachada solar como un elemento aislado carece, en la mayoría de los casos, de aplicación práctica en un edificio convencional y resulta necesario combinarla con otra serie de elementos con los que configurar un circuito solar térmico. Los componentes habituales de un circuito solar como el planteado son el tanque de almacenamiento, la bomba de circulación, el circuito hidráulico que genera el sistema y el sistema de control.

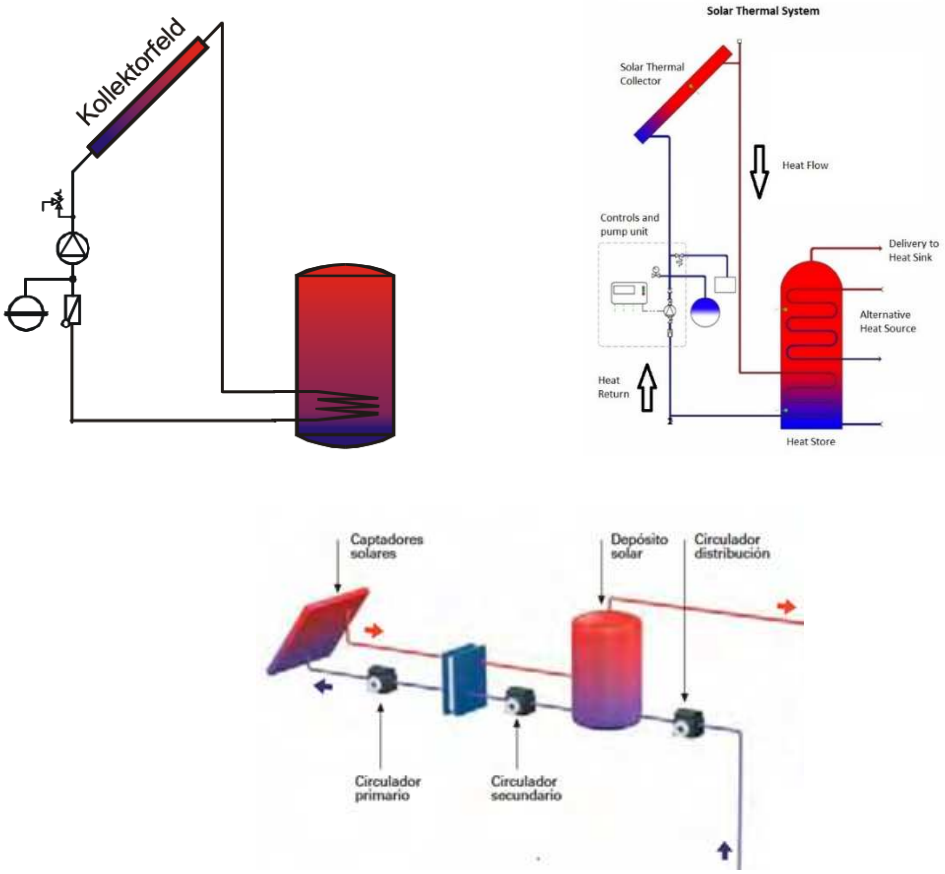



**Figura 54. Esquemas de alternativas para circuitos solares convencionales con sus componentes principales. Sistema básico (arriba - izquierda) [205] y sistema con sistema de respaldo (arriba - derecha). Variante con intercambiador de calor creando un circuito primario para los colectores y un secundario para la acumulación (abajo) [206]**

El esquema previo (Figura 54) es una representación típica de un sistema solar térmico en donde el tanque de almacenamiento recoge el calor de los colectores solares. Toda esta energía térmica almacenada en el tanque solar es la que luego se transfiere a los sistemas del edificio para calefacción y ACS en la mayoría de las aplicaciones. En algunos casos existe la posibilidad de tener un sistema de respaldo que aporte también energía al tanque de almacenamiento a través de una fuente alternativa como por ejemplo una caldera, resistencia eléctrica u otro sistema similar. Otra variante habitual es la de generar dos circuitos independientes entre los colectores (primario solar) y el almacenamiento (secundario solar), transfiriendo la energía de uno a otro a través de un intercambiador de calor.

El depósito es, después del colector, el componente clave del sistema solar puesto que determina la cantidad de energía que se puede almacenar con el conjunto. Es un elemento necesario en sistemas que emplean fuentes renovables como este, puesto que los procesos de captación y consumo de energía no están sincronizados y existe un desfase entre la generación de energía, cuando incide la radiación solar, y el consumo de agua caliente, cuando la demandan los usuarios del edificio. Los sistemas de almacenamiento se dimensionan para cubrir ciclos cortos (horas o unos pocos días) o largos (sistemas estacionarios entre meses para cubrir diferentes periodos y estaciones). En ocasiones se emplean piscinas y grandes depósitos de agua a modo de almacenamiento, especialmente en el caso de colectores no vidriados de baja temperatura.

Por otro lado, el funcionamiento del colector se encuentra influenciado por el propio depósito y el rendimiento del colector se verá afectado por el tamaño del mismo [207], consiguiendo un mejor rendimiento cuanto mayor sea el volumen del depósito, pero proporcionando una temperatura de salida menor. Otro aspecto a considerar es la estratificación del depósito, en donde se busca una distribución del líquido contenido en el mismo empleando las capas superiores más calientes para abastecer la carga a una temperatura máxima y las inferiores, más frías, como retorno al colector solar, buscando así incrementar el rendimiento de los colectores.

La circulación del fluido a través del circuito solar requiere de un flujo de caudal. Este puede ser natural generado por el efecto termosifón, o forzado a través de una bomba de circulación. El primero requiere que el depósito térmico esté en un punto más elevado que los colectores y el caudal no se suele regular como con la bomba en la que, por el contrario, se da un consumo de energía eléctrica que no se da con el sistema de termosifón.

Por tanto, y a pesar de que el elemento principal del estudio actual es el colector integrado en la fachada, para el análisis que se plantea se requerirá, en algunos casos, tomar en consideración el circuito solar y sus componentes.

# 4. MATERIALIZACIÓN DE LA SOLUCIÓN EN UN PANEL MODULAR

El presente estudio se centra en el diseño y análisis del comportamiento de una fachada activa de baja temperatura compuesta por un colector no vidriado y un panel sándwich de acero. El sistema se desarrolló como parte de un proyecto de investigación (BASSE) finalizado en 2016

[208], donde se estudió el diseño de un panel solar innovador y su interconexión a una bomba de calor. Diseñado bajo un claro enfoque hacia una producción industrializada orientada a grandes tiradas de fabricación, en el proyecto se trabajaron alternativas a los paneles sándwich actuales con el objetivo de proporcionar argumentos adicionales a favor de las fachadas solares activas. La contribución del diseño industrial en este producto supone una reducción de los costos, un mayor nivel de fiabilidad en la respuesta y comportamiento de la solución como colector solar y el apoyo de una industria ya madura, como la de los fabricantes de paneles de acero, que cuenta con una cadena de valor sólida.

Los paneles sándwich comunes son un claro resultado de las soluciones producidas y diseñadas para cumplir con varios requisitos y prestaciones, tales como las prestaciones mecánica, térmica, acústica o de permeabilidad al agua y al aire, según lo determinado por la norma específica de producto para paneles sándwich metálicos (UNE-EN 14509: 2014) [209]. Su aplicación en edificios industriales y terciarios está bastante extendida gracias a una muy competitiva relación entre coste y prestaciones. Sin embargo, el uso en oficinas y especialmente en el sector residencial es todavía bastante poco usual, probablemente debido al uso de materiales más tradicionales como la piedra, la cerámica o la madera, considerando que el acabado exterior metálico tiene un atractivo menos urbano. Sin embargo, los desarrollos recientes con fachadas modernas y avanzadas que incluyen soluciones innovadoras, recubrimientos avanzados y diversas tecnologías representan una clara oportunidad para que los acabados metálicos proporcionen soluciones modernas y técnicamente sofisticadas al entorno construido.

La orientación que se buscó explotar en el proyecto BASSE, a través de la materialización de una solución de fachada, exploraba la alta conductividad del acero como un factor ventajoso, planteando una activación en el comportamiento pasivo del panel sándwich, convirtiéndola en una envolvente activa basada en un colector no vidriado.

A continuación, se describen los aspectos fundamentales que guiaron las decisiones en cuanto a la adopción del diseño resultante para a continuación presentar el diseño final que se adoptó.

El punto de partida fue la selección de los materiales principales, aspecto que quedó inmediatamente resuelto por la presencia en el consorcio de un fabricante de acero y otro de poliuretano, siendo estos dos los materiales que más comúnmente se emplean en este tipo de soluciones.

Dejando el aislamiento en un segundo nivel de prioridad, la discusión principal discurrió en torno a la posición del circuito hidráulico, con conductos de diámetro considerablemente superiores al espesor de la chapa (del orden de 10-30 veces mayor) para un espesor de chapa de 0,7mm (espesor estándar en paneles sándwich de acero) y un diámetro exterior de tubo de en torno a 10-20 mm. Tal y como se ha descrito en el apartado 3.3.1, esto supone que en la práctica deberá existir un desfase entre los dos componentes y que el conducto quede desplazado del plano del absorbedor sobresaliendo bien por una de las caras, o por ambas si el eje del tubo se sitúa en la misma chapa. Cabría la posibilidad de generar una retícula similar al caso de los absorbedores poliméricos si bien el proceso de fabricación de un componente de estas características en acero resulta demasiado complejo siendo más interesante para una posible extrusión en aluminio tal y como se ha comentado en el apartado 3.3.1.

Desde un punto de vista estético, de integración arquitectónica, se planteó que el conducto quedase oculto hacia el interior del panel y que la cara exterior se resolviera con un acabado liso con el objetivo de proporcionar un aspecto arquitectónicamente atractivo, pretendiendo así una

mayor aceptación de la solución final en términos arquitectónicos. De esta forma se planteó un acabado estético neutro que no permite diferenciar la existencia del circuito hidráulico en el interior del panel. Cabía considerar otra serie de acabados y texturas exteriores más elaboradas con las que tampoco sea visible el circuito hidráulico, si bien dichos desarrollos quedaron excluidos en la propuesta inicial planteada, buscando en esta conceptualización un primer diseño caracterizado por la simplicidad con el que demostrar la viabilidad del concepto propuesto.

Por tanto, la propuesta se basó en el concepto de chapa "desdoblada", de acuerdo con la definición que se ha presentado anteriormente en la Tabla 8, para unir absorbedor y circuito hidráulico. De esta forma se adoptó un diseño a través de un sistema que combinase dos chapas: una exterior con un carácter estético y que cuenta con las propiedades ópticas del absorbedor y otra interior, en contacto directo con la exterior, conformada en frío en el eje longitudinal del panel, con una acanaladura que aloje el conducto pudiendo este ser de acero también, o de otro tipo de material de acuerdo con lo comentarios planteados en el apartado 3.2.1. La siguiente figura ilustra este concepto. Esta aproximación permite generar el alojamiento para el tubo en la chapa interior, pudiendo así considerar diferentes materiales y secciones con los que resolver el conducto longitudinal., mientras que las dos chapas serán de acero en esta primera aproximación.

La Figura 55 muestra la sección principal del conjunto de dos chapas y un tubo entre ellas, con el que se consigue una buena superficie de contacto entre estos tres elementos, con el fin de favorecer la transmisión de calor hacia el fluido que circula por el interior del tubo.

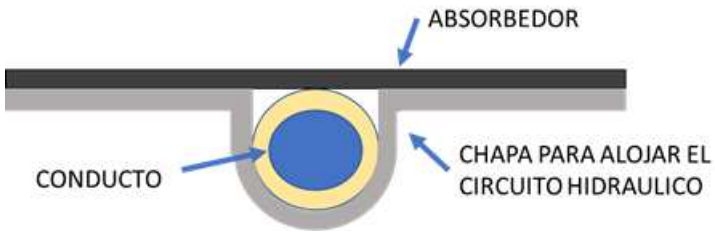



**Figura 55. Esquema en sección con la posición relativa entre conducto (polímero), absorbedor (acero) y chapa interior (acero).**

En la cara posterior del absorbedor se incorporó el aislamiento térmico, poliuretano en este caso y para completar el conjunto se añadió la tercera chapa a modo de cierre del panel. En este caso y, con el fin de buscar una solución sencilla y con una cantidad limitada de componentes y materiales, el enfoque práctico a adoptar es el de utilizar una chapa de las mismas características que la empleada para alojar el circuito hidráulico para la cara interior del panel. Incluso se podría plantear que dicha chapa interior aloje un segundo circuito hidráulico para una aplicación potencial, como la de refrigerar a través de una cámara de aire, o como sistema radiante hacia el interior del edificio cuando no hay un trasdosado y toda la envolvente queda resuelta con el panel sándwich.

Con este enfoque se adoptó una configuración clásica de panel sándwich con núcleo de poliuretano y dos chapas de acero adaptadas para alojar, en una serie de acanaladuras longitudinales y paralelas, los conductos que conforman el circuito hidráulico.

La forma en la que se planteó el montaje del panel sobre el plano de fachada fue el de superposición, a modo de demostración de un caso de rehabilitación de fachada. De esta forma se obtiene, como primera aproximación, una ejecución aislada del colector del amplio catálogo de soluciones constructivas que se pueden dar en el plano de fachada y para los que una integración en el plano principal de la envolvente requeriría de una definición específica de detalles constructivos que suponen un nivel de complejidad añadido, cuando la prioridad radica en conocer la respuesta del sistema en términos de producción energética. De esta forma, se propone, en esta primera aproximación, generar una cámara de aire posterior estanca (Figura 43 - izquierda) para diferenciarla del caso de colector solar *trans-ventilado* [184] (con un efecto de ventilación por la cámara de aire que se genera en la cara posterior). Se trata de un nivel de integración menor que el de una solución de panel completamente enrasada (Figura 43 - derecha), más fácil de resolver en edificios de nueva construcción que en el sector de la rehabilitación como el que se está estudiando.

Para configurar el circuito hidráulico se plantearon conductos paralelos longitudinales en el eje principal del panel de tal forma que su alojamiento en la chapa inferior se pueda fabricar gracias a un plegado en continuo, facilitando así el enfoque de producción en línea. En cuanto al conexionado exterior de estos tubos se optó por la solución más simple y acorde al enfoque lineal planteado, adoptando una conexión en paralelo.

En cuanto a la modulación del circuito hidráulico la propuesta es la de ajustar el módulo hidráulico y el módulo de panel conjugando ambas modulaciones para ofrecer una solución industrializada con una elevada flexibilidad. Cabría la posibilidad de resolver circuitos combinando varios paneles si bien dicho análisis se plantea para etapas más avanzadas en el desarrollo y que en cualquier caso inicialmente se considera que reducen el grado de flexibilidad de la solución. De esta forma, las combinaciones se podrán realizar combinando la unidad mínima, el panel que es el equivalente a un colector, bien en serie o en paralelo. En cualquier caso, resultará necesario analizar el conexionado de estos paneles ya que conectar demasiados colectores en serie puede suponer una merma en el rendimiento [205].

Finalmente, el tamaño mínimo de módulo y por tanto de panel será el otro aspecto a valorar. Tomando como referencia el metro de ancho del panel sándwich y que la altura típica para fachadas entre forjados está entre los 3 y los 3,5 metros, se tomará como referencia módulos múltiplos de 3 o de 3,5 metros. Esta superficie de colector está en el rango superior de los sistemas de colectores planos que suelen ser en general menores de 2,5 metros. Para considerar las posibilidades de configurar grandes superficies de fachadas activas, se plantean paneles con una dimensión máxima limitada por las posibilidades del sándwich para ser transportada (entre 15 y 18 metros que permiten resolver edificios de hasta 6 alturas) y que en cualquier caso está también en un rango cercano al de los paneles solares de mayores dimensiones que podemos encontrar hoy en día en el mercado [210].

Tomando todos los requerimientos y decisiones que se adoptaron tal y como se ha descrito en los párrafos previos, el sistema resultante para el primer prototipo es el mostrado en la Figura 56 siguiente. El diseño propuesto para la fachada activa consiste en cuatro elementos principales: (1) El panel sándwich con un núcleo de aislamiento de poliuretano combinado con dos chapas ranuradas de acero en ambas caras. Los tubos de plástico (2) se alojan en las ranuras de la chapa exterior para completar el conjunto con la chapa exterior de acero (3) que actúa como el absorbedor solar. Cada panel tiene 6 tubos paralelos y para interconectarlos en un elemento modular completo, también se incluyen conductos de unión en disposición paralela (4).

Las dimensiones principales del panel estándar son 3 m de largo, 1 m de ancho y 0,8 m de espesor. Para el montaje en fachada se adoptó asimismo una solución de panel adherido al muro existente de hormigón a través de una subestructura metálica de acero. De esta forma y junto con los perfiles de remante perimetrales se generaba una cámara de aire cerrada de 100mm de espesor entre la fachada activa y el muro soporte.

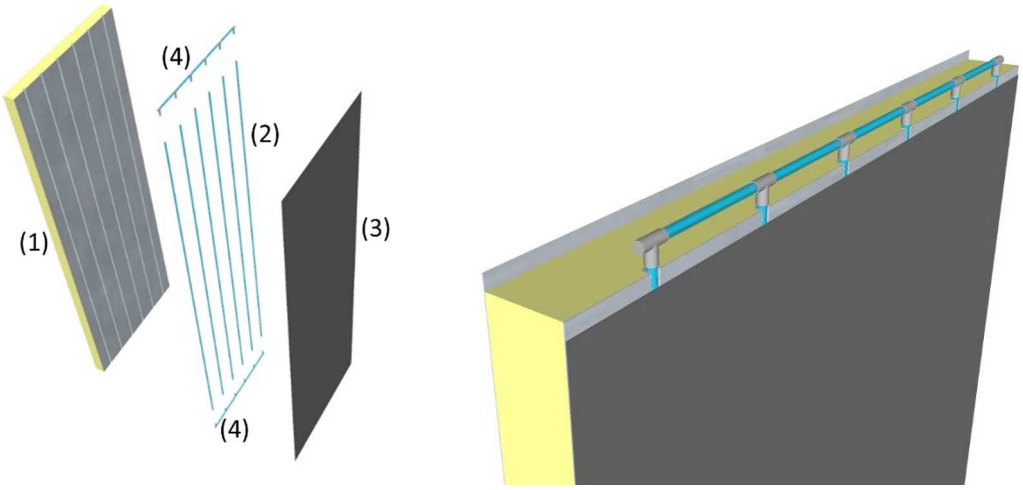



**Figura 56. Panel sándwich de acero con colector solar integrado. Componentes principales en vista explosionada (izquierda) y detalle superior de panel ensamblado.**

En este diseño inicial, el comportamiento térmico también se analizó de forma preliminar a través de unos cálculos simplificados [208], cálculos que se emplearon para decidir tanto la colocación de los conductos entre las dos chapas de acero exteriores, como la distancia de 160 mm entre tubos, para a continuación, proporcionar algunas recomendaciones sobre los componentes principales y los materiales de la solución para ese concepto inicial. A pesar de todo, los criterios principales que guiaron las decisiones que finalmente se adoptaron buscaban una solución que tuviera una clara viabilidad industrial para la producción en continuo de la solución en una línea de producción, dando como resultado el diseño presentado en la Figura 56. El análisis y estudio específico en la aplicación de alternativas al diseño y a los modos de operación no fueron cubiertos convenientemente en dichas fases de conceptualización, debido en gran medida a que el comportamiento y rendimiento reales de la solución aún era inciertos en dichas etapas iniciales del desarrollo.

En la fase final del proyecto, se instaló un sistema completo en un edificio real compuesto por una fachada activa de 18 $m^2$ combinada con una bomba de calor para producir calefacción y ACS. Como parte del estudio final del proyecto BASSE, se monitorizó el sistema durante 4 meses en el año 2016. Se instalaron un total de 6 paneles activos de 3 $m^2$ cada uno en la orientación sur en la fachada exterior del edificio KUBIK®, como se muestra en la Figura 57. Las pruebas realizadas demostraron el potencial de tales soluciones para reducir significativamente la energía final consumida [183].

**Figura 57. Fachada activa de 18m$^2$ compuesta por 6 paneles instalada en la fachada sur del edificio KUBIK®**

Tras la finalización del proyecto, se han desarrollado pruebas adicionales con el objetivo de comprender mejor la solución y mejorar su rendimiento y, con la motivación principal de, aumentar el conocimiento de dichos sistemas para promover y difundir su potencial como soluciones renovables. Tal y como se va a describir en los siguientes capítulos III y IV de la tesis, la experiencia e información recopilada en estas pruebas experimentales servirán para comprender mejor las posibilidades de este tipo de sistemas con el fin de contribuir de forma significativa a la incorporación de fuentes renovables en soluciones para edificación.

# 5. ANALISIS DE ALTERNATIVAS. PARAMETROS Y SU INFLUENCIA

En los primeros apartados de este segundo capítulo de la tesis se ha identificado en primer lugar la oportunidad que supone una fachada activa basada en el concepto de paneles sándwich (apartado 2) y se ha procedido a identificar y valorar aquellos aspectos y parámetros que previsiblemente afectan a la respuesta del sistema activo de fachada (apartado 3). Sin llegar a valorar el impacto exacto o cuantitativo de dichos factores, se ha planteado una aproximación cualitativa basada en el conocimiento e información disponible y asociada al diseño del panel a través de sus componentes principales: el panel, el circuito hidráulico y la combinación de ambos.

A continuación, en el apartado cuarto se ha presentado un sistema que fue definido como parte de un proyecto de investigación (BASSE) y en el que los factores analizados anteriormente quedaron explicitados en un diseño específico con la elección de los materiales, componentes, dimensiones y geometrías. La solución constructiva fue fabricada e instalada en un edificio real dando como resultado un rendimiento y producción energética en condiciones de uso. No obstante, se considera que la definición y diseño del sistema resultante de dicho proyecto supone la primera concepción, pero que existen opciones y modificaciones que supondrían una mejora y optimización de la solución, por lo que, tomando dicho diseño como referencia, se quiere profundizar en las alternativas que se pueden plantear para la solución de fachada activa.

Asimismo, el hecho de que esta solución se construyera en fase prototipo y se instalara en un edificio real, supone una ventaja y una oportunidad para analizar en mayor profundidad los aspectos planteados en cuanto a la incidencia de los diferentes factores en la respuesta de la solución.

Para ello, se plantea como siguiente paso del análisis y de la tesis, el desarrollo de un estudio paramétrico valorando múltiples alternativas al diseño que permita comprender las implicaciones que estas modificaciones tienen en el comportamiento del sistema, profundizando en las diferentes posibilidades que se presentan para resolver fachadas activas como la propuesta. Se trata, por tanto, de conocer el alcance real de la variación de los diferentes factores tanto de diseño como de condiciones de uso, para lo que se planteará un rango de variación para los diferentes parámetros a estudiar.

Como resultado de esta aproximación, en este quinto apartado se va a plantear el estudio paramétrico como forma de estudio para analizar las implicaciones que las alteraciones en el diseño suponen en la respuesta del sistema. Para lo que, en primer lugar, se identifican los factores que representan la respuesta del sistema, a continuación, se detallan los parámetros que se quieren estudiar para finalmente plantear la forma en la que quiere realizar el estudio.

## 5.1. Factores que determinan la respuesta del sistema de fachada activa

El principal factor que representa el comportamiento de un colector solar térmico es el rendimiento. Este factor habitualmente empleado para expresar la respuesta de la mayor parte de los equipos y máquinas en ingeniería relaciona la energía que se extrae del colector frente a la que incide en él (Ecuación (6)).

No obstante, hay un segundo factor asociado al rendimiento que permite profundizar en la forma en la que se comporta el sistema: la energía útil. Este factor que se emplea en el numerador de la fórmula del rendimiento presenta, en términos generales, una progresión similar a la del rendimiento, lo que implica que una energía útil elevada ofrece un buen rendimiento, pero no es una relación que se aprecie en todas las situaciones. Así, se pueden dar casos con un buen rendimiento, pero una energía extraída insuficiente, o en el otro extremo, una energía útil elevada, pero con un rendimiento reducido.

Por tanto, y a pesar de que también se tomará en cuenta la energía útil extraída, el rendimiento será considerado como el factor principal para el estudio, tomándolo como criterio para evaluar las diferentes alternativas de la fachada activa que se está estudiando. Tal y como se indica en la Ecuación (6) [211], el rendimiento es una relación entre la energía útil $Q_u$ extraída por el colector y la radiación solar incidente ($I_{sol}$) en el área del colector. La energía obtenida en el colector se define también como una función del salto térmico de temperatura entre la entrada y la salida del fluido que circula a través del colector.

$$\eta = \frac{Q_u}{A_c \, I_{sol}} \tag{6}$$

$$Q_u = \dot{m} \, C_w \, (T_{out} - T_{in}) \tag{7}$$

Estos dos factores, rendimiento y energía útil serán los que se tratará de maximizar con el diseño del sistema para obtener así un óptimo aprovechamiento. No obstante, tomando en consideración la aplicación práctica del sistema de fachada activa, cabe la posibilidad de que, para un rendimiento elevado, la energía útil resulte escasa para la aplicación prevista o que, por el contrario, se obtengan valores elevados de energía útil a pesar de suponer rendimientos modestos. En cualquier caso, por lo que resulta necesario hacer un diseño acorde a la aplicación prevista que busque maximizar el comportamiento del sistema para el rendimiento y/o producción esperada.

Por otro lado, la energía útil $Q_u$ se puede determinar también mediante la ecuación (8) [212], en una función dependiente de la diferencia de temperatura entre la entrada del fluido y la temperatura ambiente. $F_R$ es el factor de evacuación de calor del colector y determina la ganancia útil que se puede lograr en el colector de manera similar al rendimiento en un intercambiador de calor. $U_L$ es el coeficiente de transferencia de calor y es representativo de las pérdidas de energía térmica del colector al entorno por conducción, convección y radiación infrarroja.

$$Q_u = A_c \, F_R \, [\, \alpha \, I_{sol} - U_L \, (T_{out} - T_{amb})] \tag{8}$$

La combinación de las ecuaciones (6) y (8) es la expresión comúnmente utilizada para describir la eficiencia los colectores en función del término (Ti - Ta) / G que es la variable que determinará las pérdidas. La eficiencia máxima la proporciona ($F_R$ α) y hay un factor de reducción ($F_R$ $U_L$) que define la pendiente decreciente de esta función lineal.

$$\eta = F_R \, \alpha - F_R \, U_L \frac{(T_{out} - T_{amb})}{I_{sol}} \tag{9}$$

Los dos factores que describen la eficiencia del colector, $F_R$ y $U_L$, se determinan generalmente de forma experimental mediante ensayos. Por otro lado, en la bibliografía se pueden encontrar procedimientos analíticos para el cálculo de algunos sistemas específicos [211].

Para comprender los rangos que normalmente presentan los colectores no vidriados en términos del factor de ganancia máxima ($F_R$ α) y de pérdidas ($F_R$ $U_L$), la Tabla 9 incluye unos ejemplos a modo de referencia. Se trata de cuatro soluciones con tres materiales diferentes en el absorbedor, Cobre, Titanio-Zinc y dos variantes en Aluminio.

| **Sistema** | $F_R\,\alpha$ | $F_R\,U_L$ |
|---|---|---|
| Absorbedor de Zinc - Titanio (QUICK STEP®) [214] | 0,5 – 0,54 | 12,87 – 14,78 |
| Absorbedor de Cobre (TECU® Solar) [213] | 0,59 – 0,8 | 9,05 – 12,26 |
| Absorbedor de Aluminio – Variante 1 [215] | 0,55 – 0,58 | 7,44 – 14,0 |
| Absorbedor de Aluminio – Variante 2 [215] | 0,83 – 0,89 | 12,7 – 19,7 |

**Tabla 9. Diferentes valores de ganancia máxima ($F_R$ α) y de pérdidas ($F_R$ $U_L$) para sistemas de fachada activa con colectores no vidriados integrados**

Cabe destacar que estos valores son fruto de ensayos de sistemas reales en laboratorio y que resultan en general algo inferiores a los que se indicaban en el estado del arte [211], [216], con rangos entre 0,8 – 0,95 para ($F_R$ α) y de 10 – 20 para ($F_R$ $U_L$).

Asimismo, para el caso específico de sistemas no vidriados y tal y como se identificó también en el estado del arte, el viento supone un factor con impacto muy significativo en el rendimiento del colector. La ausencia del vidrio en la capa exterior supone un diseño más simple pero también temperaturas más bajas y una mayor dependencia de los efectos convectivos. Esto tiene principalmente un impacto en el factor de pérdidas ($F_R$ $U_L$) que determina un aumento de la pendiente de la curva con la intensidad del viento (u), pero también cierta incidencia en (FR α). La influencia del viento se introduce en la ecuación (10) según lo indicado en la norma UNE 12975-2:2006 [217].

$$\eta = \eta_0\,(1 - b_u u) - (b_1 + b_2 u)\frac{(T_m - T_{amb})}{I_{sol}} \tag{10}$$

Al igual que con $F_R$ y $U_L$, los parámetros $\eta_0$, $b_u$, $b_1$, $b_2$ también se determinan experimentalmente a través de ensayos. El factor ($F_R$ α) es ahora una función de $\eta_0$ y $b_u$, mientras que $b_1$ y $b_2$ determinarán ($F_R$ $U_L$). Para el caso de los colectores metálicos no vidriados, aunque no resultan tan abundantes como los colectores planos vidriados, existen datos publicados por organismos de certificación para productos algunos productos. Este es el caso del Sistema Energie Solaire [218] ensayado por SPF [219] y el Sistema IN.Roof [220] certificado por SRCC [221] que se describen en la siguiente Tabla 10 en la que se muestran los resultados para Energie Solaire ensayados bajo norma UNE - EN12975:2006, mientras que los de IN.Roof han sido ensayados con UNE-EN ISO 9806:2020 [222].

| Sistema | $\eta_0$ | $b_u$ | $b_1$ | $b_2$ |
|---|---|---|---|---|
| Energie Solaire (SPF Cert. nº 1209) | 0,925 | 0,012 | 11,26 | 2,45 |
| IN.Roof (SRCC Cert. nº 10002035) | 0,600 | 0,098 | 9,7449 | 1,2316 |

**Tabla 10. Diferentes factores de caracterización de paneles no vidriados con absorbedor metálicos**

Se da incluso el caso de otro sistema WAF Solar [223] en donde se ha ensayado el sistema con la norma UNE - EN12975:2006 pero con el procedimiento para soluciones vidriadas, contemplando el efecto del viento en dos ensayos: uno a 0 m/s y el segundo a 3 m/s. Para este sistema los valores declarados para los factores $\eta_0$ $a_1$ y $a_2$ son los descritos en la Tabla 11.

| Sistema | $\eta_0$ | $a_1$ | $a_2$ |
|---|---|---|---|
| WAF Solar Thermal Façade. u = 0 m/s | 0,79 | 7,558 | 0,0728 |
| WAF Solar Thermal Façade. u = 3 m/s | 0,67 | 13,268 | 0,0357 |

**Tabla 11. Diferentes factores de caracterización de paneles no vidriados con absorbedor metálicos**

A pesar de que existen ciertas diferencias entre las normas y lo métodos de todos los sistemas que se han presentado, se puede hacer una aproximación para normalizar la información y presentarla de forma que se pueda plantear una cierta equiparación entre las soluciones planteadas. Para ello, se considerará un rango entre 0 y 3 m/s de velocidad para los sistemas de la Tabla 10 y se descarta el factor $a_2$ de segundo orden representado en la Tabla 11 puesto que para soluciones no vidriadas el impacto de dicho factor es menor. Los resultados quedarán representados de acuerdo con lo trasladado en la Tabla 12.

| Sistema | $F_R\,\alpha$ | $F_R\,U_L$ | Absorbedor | u (m/s) | $A_c$ ($m^2$) |
|---|---|---|---|---|---|
| QUICK STEP® | 0,5 – 0,54 | 12,87 – 14,78 | Ti – Zi | 0 – 2 | 1,1 |
| TECU® | 0,59 – 0,8 | 9,05 – 12,26 | Cobre | NA | 2,33 |
| Sistema Aluminio – Variante 1 | 0,55 – 0,58 | 7,44 – 14,0 | Aluminio | 0 – 2,22 | 0,35 |
| Sistema Aluminio – Variante 2 | 0,83 – 0,89 | 12,7 – 19,7 | Aluminio | 0 – 2,22 | 0,35 |
| InRoof.Solar | 0,42 – 0,6 | 9,74 – 13,44 | Aluminio | 0 – 3 | 1,251 |
| AS Energie Solaire | 0,89 – 0,92 | 11,6 – 18,61 | Acero Inox. | 0 – 3 | 2,05 |
| WAF Solar | 0,67 – 0,79 | 7,56 – 13,27 | Aluminio | 0 – 3 | 2,4 |

**Tabla 12. Valores de rendimiento y características para diferentes soluciones alternativas para fachadas activas con colectores solares metálicos**

Para valorar qué factores son los que determinan la respuesta del sistema y tomando en consideración que ésta quedará definida a las expresiones presentadas en las ecuaciones (6) a (10), cabe tomar en consideración los siguientes aspectos:

- De acuerdo con la ecuación (2), para conseguir una mayor energía útil, $Q_u$, se deberá aumentar el salto térmico y/o el caudal. Esto implica temperaturas de impulsión ($T_{in}$) bajas y de retorno ($T_{out}$) altas.
- En paralelo, según la ecuación (9), para aumentar $Q_u$ se debe maximizar α. El factor de evacuación de calor $F_R$ también afecta al primer término de ganancias, pero su combinación con $U_L$ en el segundo término influye en las pérdidas. Asimismo, de

acuerdo con esta cuarta ecuación, también se deberá buscar una temperatura de impulsión igual o inferior a la temperatura ambiente ($T_{amb}$).

- Las condiciones ambientales exteriores que afectan son la radiación y el viento. La primera, a priori, implica un menor rendimiento a mayor radiación (ecuación (6)), no obstante, mayores radiaciones implicarán mayores temperaturas en el absorbedor y energía útil que captura el colector (ecuación (8)), por lo que el efecto de la radiación en el rendimiento no resulta tan evidente. Por su lado el viento afecta reduciendo el rendimiento cuanto mayor sea la velocidad del mismo (ecuación (10)).

En definitiva, aquel sistema que maximice el salto térmico entre la entada y la salida, así como el caudal será el que en términos generales produzca una mayor cantidad de energía y a priori también supongan un mayor rendimiento. Por otro lado, los factores que implican un descenso del rendimiento serán la diferencia de temperatura con la temperatura ambiente, así como la velocidad del viento. Un aumento de la radiación y la absortividad implican también una mayor cantidad de energía capturada sin embargo el término de la radiación también afecta a la reducción del rendimiento.

Se puede, por tanto, concluir que hay unos factores inherentes al diseño constructivo y que afectan a la distribución de temperaturas dentro del propio panel y que, de forma específica, representan la forma en la que el calor se transfiere desde el absorbedor hasta el fluido. Estos serán los “parámetros de diseño” y quedarán fijados una vez que el sistema haya sido definido a través de un diseño concreto que contemple materiales, dimensiones y componentes específicos y que, por tanto, no se verán alterados durante la fase de operación del sistema.

Por otro lado, se identifican otro grupo de parámetros que sí irán variando cuando el sistema activo esté funcionando como colector solar. Estas variaciones serán debidas, por un lado, a los fenómenos ambientales y, por otro lado, ocasionadas por los criterios de operación del sistema a través de los elementos de control y la interconexión con otros componentes del circuito solar y, en última instancia, consecuencia de los diferentes patrones de demanda. A este segundo grupo de parámetros ajenos al diseño físico del panel se les denominará como “parámetros dinámicos”.

En el siguiente apartado se describe en mayor detalle esta diferenciación entre parámetros de diseño y dinámicos y se indica también los que corresponden a cada grupo, así como los valores de referencia para cada caso, de acuerdo con el enfoque propuesto en el presente estudio.

## 5.2. Parámetros a analizar

Las ecuaciones de rendimiento y energía analizadas, junto con los fenómenos de transferencia de calor que se dan entre los componentes del sistema, resultan de interés para plantear 2 grupos de parámetros que a su vez cuentan con una subdivisión en cada caso:

- Parámetros de diseño. Fijos para un sistema definido o solución técnica
    - Diseño del panel sándwich
    - Diseño del circuito hidráulico
- Parámetros dinámicos durante la operación del sistema o estado de servicio
    - Dinámicos configurables
    - Dinámicos ambientales

Según la identificación de elementos y factores relevantes que se han desarrollado tanto en el apartado 3, para el caso de los parámetros de diseño, como en el apartado 4, para los parámetros dinámicos, las siguientes Tabla 13 y Tabla 14 muestran los elementos y parámetros a considerar de cara a plantear un estudio paramétrico como el que se pretende desarrollar.

| Elemento | Componente | Variantes | Parámetros a analizar |
|---|---|---|---|
| ***Panel Sándwich*** | Chapas metálicas | Absorbedor - Chapa Exterior | Absortividad, emisividad<br>Espesor y conductividad |
| | | Chapa para alojar circuito hidráulico | Espesor y conductividad |
| | | Chapa interior en contacto con la cámara de aire | Espesor y conductividad |
| | Aislamiento | Material aislante | Espesor y conductividad |
| | Cámara de aire | Cámara de aire | Sección y nivel de ventilación |
| ***Circuito hidráulico*** | Conductos longitudinales | Material | Conductividad |
| | | Diámetro Interior/Exterior | Diámetro y espesor |
| | | Disposición entre tubos paralelos | Distancia entre tubos. |
| | | Posición relativa a la chapa exterior | Profundidad y contacto |
| | Configuración Circuito hidráulico | Tipo de Mezcla | Calor Específico y densidad |
| | | Longitud de circuito | Longitud de circuito |
| | | Conexión | Serpentín / Paralelo |

**Tabla 13. Relación de parámetros de diseño a analizar en como alternativas al panel sándwich y al circuito hidráulico**

| Variables dinámicas | Parámetros a estudiar |
|---|---|
| Configurables | Caudal |
| | Temperatura de impulsión |
| Ambientales | Radiación |
| | Temperatura ambiente |
| | Velocidad del viento |

**Tabla 14. Relación de parámetros dinámicos a analizar tanto configurables como ambientales**

De cara a orientar el estudio paramétrico se plantean de esta forma una serie de factores que se diferencian entre sí:

- Por un lado, para los parámetros de diseño en el propio sistema, se analizan aspectos que una vez explicitada una solución quedarán fijados, como las dimensiones, materiales, elementos de unión, zonas de contacto… tanto del panel como del circuito. Es decir, no hay opción de modificarlos cuando el diseño está definido.
- Por otro lado, existen una serie de parámetros de operación del conjunto que sí tienen un comportamiento variable en función de las condiciones de funcionamiento. Para

estos se adopta a su vez una distinción entre aquellos que pueden tener cierto margen para ser controlados y regulados durante el funcionamiento de la fachada activa como son el caudal y la temperatura de impulsión, y, por otro lado, factores externos que no pueden ser controlados pero que inciden en el funcionamiento del colector. Estos son la temperatura ambiente, radiación y velocidad del viento.

En los siguientes apartados se detallarán para cada factor los valores con los que se va a plantear el estudio paramétrico, estableciendo de forma individualizada un valor de referencia y un valor límite inferior y superior entre los que se quiere analizar cada factor. Estos límites serán escogidos de acuerdo con el estado actual de los sistemas y de la tecnología, valorando sistemas similares al propuesto.

### 5.2.1. Parámetros de diseño del sistema

#### 5.2.1.1. Del panel

**Absorbedor y Chapas metálicas**

Según se ha comentado en los apartados 3.1.1 y 3.1.2, tanto las chapas como el absorbedor quedan condicionadas al sistema de referencia, puesto que en este caso los elementos se plantean mediante chapas metálicas frente a otros materiales como los que se emplean en ocasiones para el absorbedor, como el hormigón o los polímeros. Esta decisión está asociada al diseño según lo planteado en el apartado 4 (Materialización) en el que se opta por un desarrollo en el que los sistemas sándwich son la base del nuevo diseño.

Así, las alternativas que se plantean son fundamentalmente para soluciones resueltas con chapas metálicas y para las posibilidades que ofrecen este tipo de productos planos de espesor limitado. El elemento de referencia será el acero con sus características en cuanto a espesor y conductividad para posteriormente analizar otras alternativas de materiales metálicos como aluminio o cobre. Como una extensión al estudio planteado y para conocer las posibilidades con otros materiales, también se van a estudiar la conductividad y espesores de potenciales absorbedores resueltos con hormigón o polímeros desde una aproximación simplificada asimilándolos a las chapas metálicas.

Para la conductividad, considerando la información que se ha descrito en la Tabla 5, se analizarán valores entre desde 0,5 W/mK (material polímero) hasta 386 W/mK (cobre), cubriendo así un amplio rango entre diferentes materiales.

En el caso del espesor, las chapas metálicas en estas aplicaciones son en general más delgadas (entre 0,2 y 2,5 mm) que otros materiales como el hormigón o los polímeros que necesitan una mayor cantidad de material (5 a 50 mm) para generar una placa continua con suficiente resistencia mecánica. De cara al estudio propuesto, dado que los espesores superiores a 3 mm en metales en la práctica no son de aplicación en este tipo de aplicaciones, se asumirá que los espesores de los metales son válidos para el resto de los materiales pudiendo así explorar el efecto al cambiar de material.

La referencia será por tanto una chapa de acero de 0,7 mm de espesor y conductividad de 50 W/mK.

Por otro lado, para las propiedades ópticas en la chapa del absorbedor, se parte del caso del acero galvanizado que se emplea habitualmente en construcción como referencia (Tabla 4) y se valoran a continuación acabados específicos asociados a pinturas y lacados, así como a recubrimientos selectivos para aplicaciones solares como la prevista.

De esta forma la tabla siguiente representar los valores de referencia superior e inferior para el caso de las chapas y del absorbedor:

| **Parámetros para chapas metálicas / absorbedor** | **Valor de Referencia** | **Superior** | **Inferior** |
|---|---|---|---|
| Espesor de chapa ($e_s$) – (mm) | 0,7 | 2,5 | 0,2 |
| Conductividad ($\lambda_s$) – (W/mK) | 50 | 380 | 0,5 |
| Absortividad del absorbedor ($\alpha$) | 0,8 | 0,96 | 0,1 |
| Emisividad del absorbedor ($\varepsilon$) | 0,8 | 0,96 | 0,1 |

**Tabla 15. Valores a analizar para los parámetros de las chapas y el absorbedor**

**Aislamiento y cámara de aire**

En este caso el aislamiento que se considerará como referencia será el poliuretano puesto que es hoy por hoy es la referencia para la fabricación de paneles sándwich con espesores que van desde los 10 hasta los 200mm. En consecuencia, se propone un panel de 80 mm de espesor y conductividad de 0,025 W/mK a modo de referencia.

De forma complementaria resulta de interés considerar materiales alternativos que se comporten como material aislante ($\lambda_i$ < 0,5 W / mK). Así, en un rango superior se plantean las soluciones más convencionales como lana mineral o yeso (Tabla 5) y en un nivel inferior soluciones consideradas superaislantes como aerogeles o paneles de vacío (VIP Vaccum Insulated Panels).

Para entender el caso extremo, resulta de interés estudiar el escenario de una solución sin aislamiento, condición que se ve a su vez se verá influenciada por los efectos que se dan en la cámara de aire que se genera en la parte posterior del panel.

Asimismo, con el fin de modelar diferentes condiciones en la cámara (cerrada o ventilada - Figura 58), se plantean diferentes valores de convección en la cámara. Para representar la condición cerrada, se propone un factor de convección de 5 W/m$^2$K y, para la ventilada, se considera un valor igual al factor de convección externo entre la superficie de contacto entre la chapa exterior y el aire.

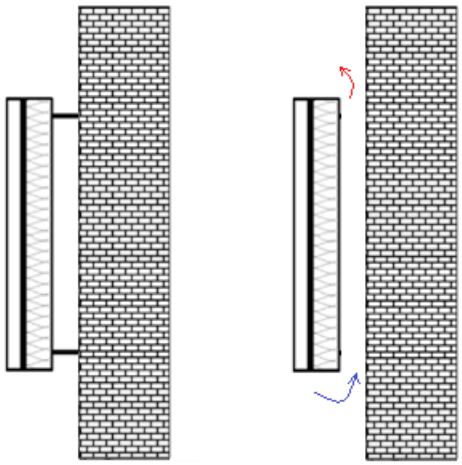


**Figura 58. Consideración de la cámara de aire trasera generada entre la fachada activa y el muro soporte. Cámara cerrada (izquierda) y abierta (derecha)**

| Parámetros para Aislamiento y cámara de aire | Valor de Referencia | Superior | Inferior |
|---|---|---|---|
| Espesor aislamiento ($e_i$) – (mm) | 80 | 200 | 30 |
| Conductividad aislamiento ($\lambda_i$) – (W/mK) | 0,025 | 0,015 | 0,05 |
| Espesor de la cámara ($e_c$) – (mm) | 60 | 100 | 20 |
| Ventilación de la cámara (-) | Sin ventilar | Altamente ventilada | Sin ventilar |

**Tabla 16. Valores a analizar para los parámetros del aislamiento y la cámara de aire**

#### 5.2.1.2. Del circuito

**Conductos longitudinales**

Al igual que en el caso del absorbedor y tal y como se ha descrito en el apartado 3.2.1, los primeros aspectos a considerar para resolver los conductos serán, el material y la geometría del tubo. Por tanto, se plantea para este elemento el análisis con conductividades que cubran el espectro que se ha definido en la Tabla 6 partiendo de valores bajos ($\lambda_p$ = 0,25 W/mK) que representan los tubos de plásticos, hasta la máxima conductividad que proporciona el cobre ($\lambda_p$ = 386 W/mK).

Considerando tubos de sección circular, para el diámetro interior una referencia habitualmente empleada es la definida por una sección de 8 mm. Esta sección de tubo es la que se adopta como referencia para el diseño estudiado tal y como se ha descrito en el apartado 4 (Figura 56) y también se puede encontrar en soluciones similares como en el caso de la fachada solar de QUICK STEP [214] o WAF [223]. Para conocer el impacto del diámetro se valorarán secciones del doble del tamaño de referencia y, en el otro extremo, diámetros menores, de hasta 2 mm, a pesar de que por debajo de los 5 mm, se supone que es un tamaño demasiado pequeño que dificulta el flujo y poco realista para el caso de aplicación previsto.

De forma similar al caso de las chapas y su espesor, existe una relación entre el diámetro y el grosor de la pared de la tubería dependiente de tipo de material y las posibilidades de

fabricación de estas soluciones para las aplicaciones hidráulicas previstas. Para la fabricación con plásticos, el espesor de pared suele ser mayor que para los metálicos cuando se trata de secciones de diámetro menores y, en ambos casos, el espesor de la pared de tubo aumenta junto con el aumento del diámetro. No obstante, con el fin de conocer mejor las implicaciones, para el presente estudio se explorarán alternativas y combinaciones que cubran el rango de parámetros planteados tanto si son soluciones estándar o no.

Por tanto, se tomará 1mm de espesor de pared de tubo para la sección de diámetro de 8 mm de base, valor habitual tanto en tubos plásticos como metálicos. Al ser un factor dependiente del material y sección con el que se fabrica el tubo (habitualmente los metálicos tienen espesores del orden de la mitad de los plásticos), se explorará un rango de espesor de tubo entre 0,5 mm y hasta 3 mm.

En cuanto a la distancia entre tubos o la cantidad de tubos paralelos por unidad de superficie, no se cuenta con referencias tan específicas puesto que este factor dependerá del diseño concreto que se adopte para la solución constructiva seleccionada, así como de la modulación empleada que, tal y como se ha comentado en el apartado 3.3.2, estará a su vez influenciada por las dimensiones del panel: ancho o largo, dependiendo de la disposición de los paneles y del tipo de conexión empleada. De nuevo, se tomará como referencia un valor de 160 mm de separación de acuerdo con el diseño descrito en el apartado 4 (Figura 56), valor que se adoptó principalmente por la necesidad de ajustar un número determinado de tubos (6 en este caso) al ancho fijo de panel de un metro. Tomando en consideración que una mayor densidad implica una mayor superficie de intercambio, pero también un aumento de la complejidad de la solución, se valorarán separaciones entre 80 mm y 240 mm, lo que por panel supone 12 y 4 tubos respectivamente para 1 m. de ancho.

Por último, para valorar la profundidad del tubo, se partirá del caso en el que la profundidad es 0 mm y en la que, además, se da un contacto directo entre tubo y chapas, para ir aumentando la separación entre ambos elementos hasta los 15 mm de distancia. En el primer caso, el contacto entre sólidos facilitará la transferencia de calor a través de la conducción, mientras que una vez separados esa transferencia estará sujeta a los fenómenos de convección y radiación.

| **Parámetros para Conductos longitudinales** | **Valor de Referencia** | **Superior** | **Inferior** |
|---|---|---|---|
| Conductividad ($\lambda_p$) – (W/mK) | 0,028 | 0,015 | 0,05 |
| Diámetro interior ($D_i$) – (mm) | 2 | 8 | 16 |
| Pared de tubo ($e_p$) – (mm) | 1 | 3 | 0,5 |
| Distancia entre tubos paralelos ($D_p$) – (mm) | 160 | 240 | 80 |
| Profundidad con chapa exterior ($D_e$) – (mm) | 0 | 15 | 0 |

**Tabla 17. Valores a analizar para los parámetros de los conductos longitudinales**

**Configuración Circuito hidráulico**

Para valorar la configuración del circuito hidráulico, se considera el caso de un sistema compuesto por tubos paralelos que pueden ser conectados en sus extremos para resolver tanto un caso en serpentín como en paralelo (apartado 3.3.2). De esta forma se idealiza la disposición del circuito considerándose un elemento único, con un eje principal, de longitud notablemente mayor que el resto de las dimensiones del panel, con el fin de obtener un único elemento

representativo del circuito. De hecho, esa longitud equivalente del circuito se verá influenciada por las alternativas en el conexionado. El conexionado para conformar un serpentín o circuito en paralelo se considerará en función de la longitud y caudal que resultan de cada configuración. Así, un circuito en serpentín se puede representar como un único tubo longitudinal por el que circula el 100% del caudal, mientras que, en el caso del circuito en paralelo, el caudal se reparte de forma proporcional entre el número de tubos dispuestos en paralelo que contarán con una longitud menor que su equivalente en serpentín.

Por otro lado, de forma independiente a la relación con el tipo de conexión, la longitud es un factor de diseño clave con una especial relevancia al plantear el análisis. El hecho de que se proponga el estudio paramétrico para estudiar aplicaciones de fachadas activas implica que, en general, van a tener una longitud considerable para evitar el empleo de muchas piezas pequeñas que luego deben ser conectadas para materializar el sistema hidráulico. Como primera aproximación, se definirá un planteamiento de fachada dispuesta con en el eje principal en posición vertical. Esta forma de resolver los paños verticales es habitual en soluciones industrializadas como la propuesta, por lo que se suelen plantear piezas con una longitud determinada por la distancia entre ejes de forjados (3 – 3,5 m.) para poder resolver las zonas exentas de la fachada (Figura 41), dejando las zonas de huecos con una longitud variable en función de la modulación requerida.

Finalmente, en lo que respecta al fluido, la referencia será el agua debido a su simplicidad y ventajas asociadas [224]. En el análisis de alternativas se considerarán especialmente aquellas que supongan alguna ventaja operativa, como, por ejemplo, evitar problemas de congelación (apartado 3.2.4). En estos casos, se valorarán mezclas con otros aditivos, alcoholes principalmente: etanol y glicol (Tabla 7). Existen otros nano-fluidos específicamente diseñados para este tipo de aplicación sobre los que se está investigando actualmente [225], si bien, para el estudio planteado se va a limitar el análisis a mezclas que se emplean de forma habitual en este tipo de aplicaciones.

En la tabla siguiente se representa la mezcla a través de su calor específico, por estar directamente asociado a la producción solar (ecuación (5)). Aunque no se recojan en este caso, es importante destacar que para el estudio se deberán considerar también el resto de los parámetros característicos de la mezcla como densidad, viscosidad etc. Que tienen incidencia en el resultado.

| **Parámetros para Configuración circuito hidráulico** | **Valor de Referencia** | **Superior** | **Inferior** |
|---|---|---|---|
| Calor específico de mezcla ($C_w$) – (J/kg K) | 4180 | 4250 | 3950 |
| Longitud (L) – (m) | 3 | 18 | 3 |
| Conexionado Tubos (-) | Paralelo | Serpentín | - |

**Tabla 18.Valores a analizar para los parámetros de configuración del circuito hidráulico**

### 5.2.2. Parámetros exteriores con influencia en el rendimiento

Frente a los parámetros de diseño descritos en el punto anterior y que quedan fijados una vez se ha definido el diseño, hay una serie de parámetros exteriores que tal y como se ha comentado

en el apartado 5.1, tienen también efecto en el rendimiento y prestaciones del conjunto. Se trata de un total de cinco parámetros adicionales que no están asociados al diseño específico del panel en cuanto a sus características, materiales y propiedades, pero que sí que se deben tener en consideración puesto que inciden de forma significativa en la respuesta.

Así se distinguirá entre:

- Parámetros dinámicos de configuración. Aquellos que se pueden ser regulados durante la operación del sistema hidráulico: caudal y temperatura de impulsión.
- Parámetros dinámicos ambientales. Asociados a las condiciones exteriores, éstos no pueden ser controlados y vienen impuestos: radiación, temperatura ambiente y velocidad del viento.

#### 5.2.2.1. Dinámicos de configuración

**Caudal**

Para los parámetros dinámicos de configuración el caudal es el que mayores posibilidades de regulación proporciona, puesto que es un factor que habitualmente puede ir variándose en los circuitos hidráulicos a través de dispositivos de regulación de caudal o mediante el empleo de bombas de caudal variable. En este caso, el caudal de referencia adoptado lo determinó el mínimo que permitía la bomba de impulsión instalada en el conjunto que se instaló en KUBIK®: 0,13 kg/s por $m^2$. Este es un valor (468 kg/$m^2$h) sustancialmente superior a referencias similares que se encuentran tanto en la bibliografía (70-80 kg/$m^2$h) [198] como en soluciones de fachadas activas equiparables (35 – 40 kg/$m^2$h) [213] [223].

Por tanto, para el caso del caudal la referencia estará en el rango superior de los casos a analizar y se buscará estudiar el efecto que se obtiene con caudales 10 veces inferiores. De forma cualitativa, se asumirá que al reducir el caudal se obtienen mayores temperaturas gracias a una mejor transferencia de calor. No obstante, esas temperaturas mayores implicarán probablemente mayores pérdidas, por lo que el efecto en el rendimiento no es evidente y deberá ser analizado conveniente para todo el conjunto.

**Temperatura de impulsión**

La temperatura de impulsión es un parámetro directamente vinculado al diseño del sistema, con especial relación con el depósito de almacenamiento y su estratificación (apartado 3.3.3). Sin embargo, la operación del sistema también afectará a la temperatura a la que se encuentra el fluido dentro del tanque: si esta energía se transfiere al resto del sistema la temperatura disminuirá.

En términos generales el diseño del sistema deberá permitir que este proceso de descarga del tanque se pueda realizar de forma acoplada o desacoplada con la operación de captación a través del colector. Los valores de referencia a emplear para la temperatura de impulsión serán aquellos asociados a la aplicación prevista, así como a los valores ambientales, por lo que se adoptarán 15 °C como referencia.

| Parámetros Dinámicos Configurables | Valor de Referencia | Superior | Inferior |
|---|---|---|---|
| Temperatura de impulsión. ($T_{in}$) – (°C) | 15 | 10 | 45 |
| Caudal másico. ($\dot{m}$) – (kg/s) | 0,13 | 0,04 | 0,2 |

**Tabla 19.Valores a analizar para los parámetros dinámicos de configuración**

#### 5.2.2.2. Dinámicos ambientales

A diferencia de los parámetros de configuración, los parámetros meteorológicos pueden predecirse, pero no pueden controlarse ni ser adaptados según las condiciones requeridas de la misma manera que se actúa sobre los parámetros dinámicos de configuración. No obstante, existe una relación de dependencia entre ellos: a mayor radiación, mayores temperaturas durante el día. Un aumento de la velocidad del viento implica bajada de temperatura frente a una condición de no viento debido al efecto de la convección en la superficie de fachada. En cualquier caso, sí se puede afirmar que se da un rango amplio de combinaciones entre estos factores a lo largo del año durante las diferentes estaciones.

En este caso se han adoptado unos valores de referencia promedio tomando en consideración los valores registrados a lo largo del año en la ubicación en la que se han instalado los prototipos (Derio, Bizkaia), gracias al programa experimental desarrollado, que será descrito en detalle en el capítulo IV de la tesis. Estos serán una temperatura ambiente de 14 °C, velocidad del viento de 1,5 m/s y radiación de 600 W/m$^2$.

| Parámetros Dinámicos Ambientales | Valor de Referencia | Superior | Inferior |
|---|---|---|---|
| Radiación Solar ($I_{sol}$) – (W/m$^2$) | 600 | 100 | 1000 |
| Velocidad de viento. (U) – (m/s) | 1,5 | 1 | 6 |
| Temperatura ambiente. ($T_{amb}$) – (°C) | 14 | 5 | 40 |

**Tabla 20. Valores a analizar para los parámetros dinámicos ambientales**

### 5.3. Planteamiento del estudio paramétrico

Para entender el efecto de los diferentes parámetros, resulta necesario, tal y como se ha comentado en el apartado 5.1, conocer la temperatura a la que sale el fluido del colector ($T_o$), puesto con ese dato y conocidos el resto de factores (temperatura de impulsión, caudal, radiación…), se podrá calcular la energía útil $Q_u$ (ecuación (7)). A continuación, con la energía se estima el rendimiento del sistema (ecuación (6)).

De esta forma, interesa conocer la distribución de temperaturas y flujos de calor en el panel, para analizar los fenómenos que se dan en el mismo. El funcionamiento lógico del mismo debería ser que el sol caliente el absorbedor y, si el diseño es el adecuado, se trasladará el calor hacia el fluido incrementando la temperatura de salida ($T_{out}$). Por tanto, una temperatura superficial mucho más elevada que la del fluido implicará que no se está trasladando correctamente el calor y que el calor no está siendo aprovechado de la forma que se esperaba.

Cuanto más se parezcan la temperatura superficial del absorbedor y la del fluido, una vez se alcance un régimen estacionario, mejor será el rendimiento del colector.

El objetivo del estudio paramétrico es entender, analizar y cuantificar en qué medida afectan las variaciones de los parámetros considerados, tanto los de diseño del sistema (apartado 5.2.1), como los dinámicos (apartado 5.2.2). Para ello se plantea tomar los valores de referencia que se han ido definiendo de forma individual y variarlos para obtener la temperatura y rendimiento del sistema. De esta forma se obtendrá el impacto de cada medida de forma individualizada.

Para poder llevar a cabo este estudio resulta necesario contar con un modelo de la fachada activa, por lo que el primer paso será valorar alternativas analíticas simplificadas y, en función de los resultados y versatilidad ofrecidos, considerar el posible interés de plantear el desarrollo de modelos más sofisticados mediante herramientas software de simulación más avanzadas.

### 5.3.1. Modelo teórico

Existe en la bibliografía un método analítico basado en cálculos numéricos [211] que permite determinar el factor $F_R$ para una configuración de colector de tipo "tubo y chapa" como la que se está considerando en este estudio. Asimismo, el mismo método indica que se puede estimar $U_L$ utilizando la equivalencia de resistencias para el efecto de las pérdidas de calor debidas a los fenómenos de conducción, convección y radiación.

En la determinación de $F_R$ se requieren factores adicionales como el factor de eficiencia del colector (F'), la eficiencia estándar de la aleta para secciones rectas (F) y la variable $C_L$.

F 'y F son adimensionales, mientras que $C_L$ viene expresada en $m^{-1}$. La forma de calcular estos parámetros ($F_R$, F', F y $C_L$) viene indicada en las siguientes ecuaciones (11), (12), (13) y (14) respectivamente. El factor $D_p$ indica la distancia entre ejes del conducto.

Por otro lado, F', $F_R$ y $U_L$ permiten el cálculo ([211], [226] y [227]) de las temperaturas del fluido en la salida del colector ($T_{out}$) y la temperatura media en el absorbedor ($T_s$), tal y como se muestra en las ecuaciones (15) y (16) respectivamente.

$$F_R = \frac{\dot{m}\, C_w}{A_c\, U_L}\ [\,1 - \ e^{-\left(\frac{A_c\, U_L\, F'}{\dot{m}\, C_w}\right)}] \tag{11}$$

$$F' = \left(\frac{D_p}{D_i + \left(D_p - D_i\right) F} + \frac{D_p\, U_L}{\pi\, D_i h_f}\right)^{-1} \tag{12}$$

$$F = \frac{\tanh\ \left[C_L\left(D_p - D_i\right)/2\right]}{C_L\left(D_p - D_i\right)/2} \tag{13}$$

$$C_L = \sqrt{\frac{U_L}{\lambda_s t_s}} \tag{14}$$

$$T_{out} = T_{amb} + \frac{\alpha I_{sol}}{U_L} + \left(T_{in} - T_{amb} + \frac{\alpha I_{sol}}{U_L}\right) e^{-\left(\frac{A_c\, U_L\, F'}{\dot{m}\, C_w}\right)} \tag{15}$$

$$T_s = T_{in} + \frac{Q_u}{A_c\, U_L\, F_R}(1 - F_R) \tag{16}$$

Esto implica que, para el caso analítico, las expresiones (11) a (16) representan un sistema complejo de ecuaciones no lineales dependientes que requieren de múltiples iteraciones para ser resuelta. La dependencia de algunos parámetros de la temperatura también se debe tomar en consideración a la hora de abordar el estudio paramétrico que se pretende desarrollar, por lo que el análisis de múltiples alternativas hará necesario emplear algún software de cálculo que automatice el procedimiento.

El enfoque analítico ha sido utilizado previamente por de algunos autores [226] que han empleado las ecuaciones descritas anteriormente para desarrollar un análisis paramétrico. Sin embargo, el uso de un modelo y software CFD (Fluido Dinámica Computacional, *Computer Fluid Dynamics*) proporciona una mayor flexibilidad para considerar múltiples alternativas, incluidas las entradas dinámicas, permitiendo así una mayor comprensión del sistema y de su evolución en el tiempo.

La alternativa de la simulación por CFD se complementará, asimismo, con la validación experimental que se puede obtener para los modelos, gracias a la posibilidad de contrastar datos reales obtenidos de la monitorización desarrollada durante varios meses en los prototipos y sistema construidos en la infraestructura experimental KUBIK®. Los detalles de la experimentación desarrollada se encuentran en los capítulos III y IV de la tesis.

Este enfoque combinando un modelo CFD con validación experimental, ha sido anteriormente empleado en estudios con colectores solares no vidriados con absorbedor de hormigón [227] y de aluminio [228], así como en colectores vidriados con absorbedor de cobre [229]. El uso de modelos CFD sin validación experimental también se ha descrito para paneles sándwich de aluminio actuando como un colector no vidriado [230] y para sistemas no vidriados genéricos [231].

Por tanto, se concluye que para el estudio paramétrico se va a desarrollar un modelo CFD específico [232], modelo que será validado con los datos experimentales, para a continuación analizar el impacto que supone alterar los factores que se han definido en el presente capítulo, específicamente en el apartado 5.2. La información referida al diseño y validación del modelo, así como los resultados del estudio paramétrico se va a detallar en el siguiente capítulo III de la tesis.

# 6. CONCLUSIONES

Para el planteamiento de este capítulo II de la tesis, se han tomado en consideración las conclusiones del primer capítulo en el que se identificaba la oportunidad asociada al desarrollo de una fachada activa de acuerdo con los siguientes requerimientos: que sea un concepto industrializado, basado en la tecnología de la fabricación en acero y de los paneles sándwich y que permita integrar un concepto sencillo de colector solar térmico, mediante una solución arquitectónica en la que no se aprecien diferencias entre los paneles activos y los no activos.

En este capítulo se ha planteado y definido un concepto de acuerdo con dichos principios. Para ello, se han considerado los elementos principales junto con las características representativas de los mismos (circuito y panel), en lo que al rendimiento se refiere, destacando el potencial impacto que tienen en la respuesta del sistema. La primera aproximación a esta descripción de posibilidades mediante la identificación de características relevantes ha sido cualitativa.

A continuación, se ha constatado la necesidad de analizar y valorar diseños alternativos en cuanto a sus principales componentes y elementos para lo que se ha identificado la oportunidad asociada a la implantación experimental en KUBIK®. La combinación de los aspectos asociados a la conceptualización de soluciones de fachadas activas, el desarrollo de modelos avanzados con los que desarrollar estudios paramétricos que son validados con datos experimentales, junto con los resultados del sistema funcionando en condiciones reales de uso son los aspectos fundamentales y singulares de esta tesis. Se trata por tanto de demostrar la viabilidad de las fachadas activas integradas en la tecnología de los paneles sándwich en acero a través de todos estos aspectos.

De esta forma y, en línea con el planteamiento propuesto, se han identificado en este segundo capítulo los parámetros que se quieren analizar y, entre qué rangos, para comprender convenientemente el impacto de cada medida en la respuesta del sistema. Se ha concluido con la necesidad de desarrollar un estudio paramétrico con los factores definidos y cuantificados.

El siguiente paso ha sido valorar el desarrollo del estudio paramétrico con un método analítico basado en las ecuaciones de comportamiento. Tomando en consideración experiencias similares y la ventaja que ofrece el desarrollo experimental llevado a cabo durante el transcurso de la investigación desarrollada y que será descrito en los capítulos siguientes (III y IV), se ha concluido que desarrollar un modelo CFD específico es la alternativa más interesante. De esta forma se persigue un método que ofrecerá mayor flexibilidad y que redundará en un estudio más amplio y pormenorizado de las posibles alternativas que se pueden considerar para desarrollar fachadas activas.

El próximo paso es cuantificar dicho impacto en términos de rendimiento y energía susceptible de ser generada para poder valorar aplicaciones prácticas de este tipo de soluciones de fachada activa. Para ello en el siguiente capítulo III se va a desarrollar un modelo CFD específico y se va a completar el estudio paramétrico propuesto. Esta información aportará información valiosa para el análisis experimental que se va a plantear en los sucesivos capítulos.

# 7. REFERENCIAS


[171] Giovanardi, A., Passera, A., Zottele, F., & Lollini, R. (2015). Integrated solar thermal façade system for building retrofit. Solar Energy. https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.10.034.

[172] Arregui B., Garay R., Elguezabal P. (2017). Hybridization of solar thermal systems into architectural envelopes. PowerSkin 2017. Conference. January 19, 2017. Munich. Alemania. ISBN-13: 978-94-92516-29-9. pp 279-288

[173] Chica, J.A., Apraiz, I., Elguezabal, P., Rips, M. O., Sánchez, V. & Tellado, B. (2011) Kubik: Open building approach for the construction of an unique experimental facility aimed to improve energy efficiency in buildings. Open House International, 36 nº1 63–72

[174] Visa, I., Comsit, M., & Duta, A. (2014). Urban acceptance of facade integrated novel solar thermal collectors. In Energy Procedia. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.02.161

[175] Gillette, R. B. (1960). Selectively emissive materials for solar heat absorbers. Solar Energy 4 (4), 1960, 24 – 32

[176] Müller, S., Giovannetti, F., Reineke-koch, R., Kastner, O., & Hafner, B. (2019). Simulation study on the efficiency of thermochromic absorber coatings for solar thermal flat-plate collectors. Solar Energy, 188 (April), 865–874. https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.06.064

[177] Izard, J.L & Guyot, A. (1979) Archi Bio. Éditions Parenthèses, Marseille.

[178] Catalogo elementos constructivos. CTE. (2011). https://www.codigotecnico.org/index.php/menu-catalogo-informatico-elementos-constructivos.html

[179] UNE. Normalización Española UNE-EN ISO 10456:2012. 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. (ISO 10456:2007)

[180] Aditya, L., Mahlia, T. M. I., Rismanchi, B., Ng, H. M., Hasan, M. H., Metselaar, H. S. C., … Aditiya, H. B. (2017). A review on insulation materials for energy conservation in buildings, 73, 1352–1365. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.034

[181] Kolaitis, D. I., Malliotakis, E., Kontogeorgos, D. A., Mandilaras, I., Katsourinis, D. I., & Founti, M. A. (2013). Comparative assessment of internal and external thermal insulation systems for energy efficient retrofitting of residential buildings. Energy & Buildings, 64, 123–131. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.04.004

[182] Elguezabal, P., & Garay, R. (2015). Experiences when employing different alternatives for envelope upgrading. Journal of Facade Design and Engineering, 3(1), 81–89. https://doi.org/10.3233/FDE-150032

[183] Elguezabal, P., Garay, R., & Martin, K. (2017). Experimentation under real performing conditions of a highly integrable unglazed solar collector into a building façade. Energy Procedia (Vol. 122). https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.395

[184] Maurer, C., Cappel, C., & Kuhn, T. E. (2015). Simple models for building-integrated solar thermal systems. Energy and Buildings, 103, 118–123. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.05.047

[185] Plastics Technology. Plastics That Conduct Heath. (2001) https://www.ptonline.com/articles/plastics-that-conduct-heat

[186] CoolPoly® Thermally Conductive Plastics. https://www.celanese.com/coolpoly

[187] ThermatecTM. Polyone. https://www.polyone.com/products/

[188] Patterson, J. E., Ph, D., Miers, R. J., Ph, D., & Carolina, N. (2009). The Thermal Conductivity of Common Tubing Materials Applied in a Solar Water Heater Collector.

[189] Guineplast. Polietileno de alta densidad (PE-HD). http://www.guineplast.com/productos/caracteristicas.htm

[190] Shojaeizadeh, E., Veysi, F., Yousefi, T., & Davodi, F. (2014). An experimental investigation on the efficiency of a Flat-plate solar collector with binary working fluid: A case study of propylene glycol (PG)– water. Experimental Thermal and Fluid Science, 53, 218–226. https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2013.12.011

[191] Kjellsson, E. (2009). Doctoral Thesis. Solar Collectors Combined with Ground-Source Heat Pumps in Dwellings. Analyses of System Performance. Lund University. 2009. ISBN 978-91-88722-40-9.

[192] Chengbin L., Chengxin L., Quanjun X., Et Al. (1991). Chinese Patent nº. CN1073381 (A). Technology and equipment for manufacturing solar heat collector

[193] Brandl, D., Schober, H., & Hochenauer, C. (2018). Analysis of Heating Effects and Deformations for a STAF Panel with a Coupled CFD and FEM Simulation Method. Journal of Facade Design & Engineering, 6(3), 116–131. https://doi.org/10.7480/jfde.2018.3.2567

[194] Zhang, X., Shen, J., Lu, Y., He, W., Xu, P., Zhao, X., Dong, X. (2015). Active Solar Thermal Facades (ASTFs): From concept, application to research questions. Renewable and Sustainable Energy Reviews. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.108

[195] Triple Solar BV. https://www.triplesolar.eu/home/

[196] Slebos H., El Al., Netherlands Patent nº. NL2003120 (C2) (2011). Heat exchanger panel, suitable as a construction element in the form of a ceiling, wall, roof and floor element

[197] Rassamakin, B., Khairnasov, S., Zaripov, V., Rassamakin, A., & Alforova, O. (2013). Aluminum heat pipes applied in solar collectors. Solar Energy, 94, 145–154. https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.04.031

[198] Maurer, C., Cappel, C., & Kuhn, T. E. (2017). Progress in building-integrated solar thermal systems. Solar Energy. https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.05.065

[199] Weiland, F., Kirchner, M., Rensinghoff, V., & Giovannetti, F. (2019). Performance assessment of solar thermally activated steel sandwich panels with mineral wool core for industrial and commercial buildings. Journal of Physics: Conference Series 1343 012098. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1343/1/012098

[200] Bartelsen, B., Rockendorf, G., Vennemann, N., Tepe, R., Lorenz, K., & Purkarthofer, G. (2000). Elastomer – Metal – Absorber: Development and application. Solar Energy, 67, 215–226.

[201] Fine Home Building. https://www.finehomebuilding.com/2016/09/01/radiant-ready-subfloor

[202] O 'hegarty, R., Kinnane, O., & Mccormack, S. J. (2017). Parametric investigation of concrete solar collectors for façade integration. Solar Energy, 153, 396–413. https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.05.092

[203] Medved, S., Arkar, C., & Černe, B. (2003). A large-panel unglazed roof-integrated liquid solar collector-energy and economic evaluation. Solar Energy, 75, 455–467. https://doi.org/10.1016/j.solener.2003.09.009

[204] Burch, J., Christensen, C., Salasovich, J., & Thornton, J. (2004). Simulation of an unglazed collector system for domestic hot water and space heating and cooling. Solar Energy, 77, 399–406. https://doi.org/10.1016/j.solener.2003.12.014

[205] COMBISOL Project. Solar Combi Systems Promotion and Standardization. (2010) Final report. https://ec.europa.eu/energy/intelligent/projects/sites/iee-projects/files/projects/documents/combisol_publishable_report_en.pdf

[206] Rodriguez-Hidalgo MC. Estudio en régimen transitorio de plantas solares térmicas de propósito múltiple. Aplicación al diseño de instalaciones concebidas para agua caliente sanitaria. (2010), Tesis Doctoral. Universidad Carlos III de Madrid

[207] Çomakli, K., Çakir, U., Kaya, M., & Bakirci, K. (2012). The relation of collector and storage tank size in solar heating systems. Energy Conversion and Management. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.01.031

[208] Boudjabeur, S., Harper, C., Elguezabal, P., Garay, R., Chica, J.A., Aranburu, L., … Toledo, C. (2018). Building active steel skin. (BASSE). Grant agreement nº: RFSR-CT-2013 - 00026. Final report, ISBN 978-92-79-94133-7. ISSN 1831-9424. https://publications.europa.eu/en/web/general-publications/publications

[209] UNE. Normalización Española. UNE-EN 14509: 2014. Paneles sándwich aislantes autoportantes de doble cara metálica. Productos hechos en fábrica. Especificaciones.

[210] Winkler Solar. http://www.winklersolar.com/

[211] Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). Solar Engineering of Thermal Processes (4th Edition). Wiley.

[212] Smith, C., & Weiss, T. (1977). Design application of the Hottel-Whillier-Bliss equation. Solar Energy, Volume 19 Pages 109-113.

[213] TECU® Solar System Factsheet. http://www.kme.com

[214] QUICK STEP® SolarThermie Factsheet. www.rheinzink.de

[215] Garay-Martinez, R., Arregi-Goikolea, B., Bonnami, P., Raji, S. & Lopez, J. (2017). Concept, development and thermal characterization of an unglazed solar thermal collector for façade integration. DYNA, 92(4). 466-472. DOI: http://dx.doi.org/10.6036/8108

[216] Giovanardi, A. (2012). Integrated solar thermal facade component for building energy retro. PhD Thesis. Università degli Studi di Trento

[217] UNE. Normalización Española. UNE-EN 12975-2:2006 Sistemas solares térmicos y componentes. Captadores solares. Parte 2: Métodos de ensayo.

[218] Modelo Kollektor AS. SPF Cert. nº 1209. Energie Solaire. https://www.energie-solaire.com/

[219] SPF Institut für Solartechnik. https://www.solarenergy.ch/

[220] Modelo INRoof Integrated Solar Thermal Panel. (SRCC Cert. nº 10002035) INRoof.Solar. https://www.inroof.solar/

[221] Solar Rating & Certification Corporation (ICC-SRCC™). http://solar-rating.org/

[222] UNE-EN ISO 9806:2020. Energía solar. Captadores solares térmicos. Métodos de ensayo. (ISO 9806:2017)

[223] WAF Fassadensysteme. Technical Data Sheet. https://www.waf.at

[224] Shojaeizadeh, E., Veysi, F., Yousefi, T., & Davodi, F. (2014). An experimental investigation on the efficiency of a Flat-plate solar collector with binary working fluid: A case study of

propylene glycol (PG) – water. Experimental Thermal and Fluid Science, 53, 218–226. https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2013.12.011

[225] Gazi, M. (2018). Experimental Performance Analysis of Flat Plate Solar Collectors Using Different Nanofluids. https://doi.org/10.3390/su10061794

[226] Walsh, M., & Lin, W. (2015). A Parametric Study on the Thermal Performance of Unglazed Solar Water Collectors with Their Colorbond Steel Absorber Plates Also Used as Roofs. International Journal of Green Energy, 12, 1309–1322. https://doi.org/10.1080/15435075.2013.858045

[227] O'Hegarty, R., Kinnane, O., & McCormack, S. J. (2017). Concrete solar collectors for façade integration: An experimental and numerical investigation. Applied Energy, 206, 1040–1061. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.08.239

[228] Gunjo, D. G., Mahanta, P., & Robi, P. S. (2017). CFD and experimental investigation of flat plate solar water heating system under steady state condition. Renewable Energy, 106, 24–36. https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.12.041

[229] Allan, J., Dehouche, Z., Stankovice, S., & Harries, A. (2017). Computational Fluid Dynamics Simulation and Experimental Study of Key Design Parameters of Solar Thermal Collectors. Journal of Solar Energy Engineering, 139(5), 051001. https://doi.org/10.1115/1.4037090

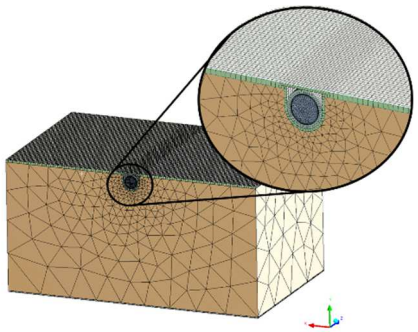
[230] Schober, H., Brandl, D., Zellinger, M., Mach, T., & Englhardt, O. (2015). Hybrid Element Façade - Thermal Engineering and Related Structural Evaluation of a Solar Activated Integral Panel. Advanced Building Skins 2012 - TU Graz, Graz, Austria. Conference Proceedings. 89 – 101. ISBN: 978-3-85125-397-9. http://lamp.tugraz.at/~karl/verlagspdf/advanced-building-skins.pdf

[231] Colombo, L.P.M., Joppolo, C.M., Molinaroli, L., & Rovelli, E. (2014). An Approximate Analytical Approach to Steady State Simulation of Unglazed Solar Collectors, Energy Procedia. 48 (2014) 28–36. doi:10.1016/J.EGYPRO.2014.02.005

[232] Leone, G., & Beccali, M. (2016). Use of finite element models for estimating thermal performance of façade-integrated solar thermal collectors. Applied Energy, 171, 392–404. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.03.039

# CAPITULO III. Estudio y análisis de la nueva solución de fachada activa

1. INTRODUCCION
2. MODELADO PARA REALIZAR EL ANÁLISIS PARAMÉTRICO
3. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DEL MODELO
4. ESTUDIO PARAMETRICO
5. CURVAS DE CARACTERIZACION DEL PANEL
6. ANALISIS DE RESULTADOS DEL ESTUDIO PARAMETRICO
7. CONCLUSIONES
8. REFERENCIAS



*Planteado el diseño de la fachada solar en el capítulo previo, en este tercer capítulo se valoran alternativas al concepto propuesto, analizando el impacto de los diferentes parámetros de diseño y de operación en la respuesta de la fachada solar. Para ello se desarrolla un estudio paramétrico, investigando la influencia de 17 parámetros, estudio que se desarrolla empleando un modelo CFD validado con resultados experimentales.*

# 1. INTRODUCCION

Tomando en consideración el estado del arte descrito en el primer capítulo de la tesis y la oportunidad detectada en el ámbito de las fachadas activas, en el segundo capítulo se ha planteado un concepto de fachada que integra un colector solar en un sistema que se concibe sobre la tecnología constructiva de los paneles sándwich de acero.

A continuación, se han identificado y analizado los principales factores asociados al comportamiento activo de la solución y se ha puesto de manifiesto la necesidad de estudiar y valorar alternativas para considerar diferentes diseños y soluciones que permitan comprender mejor el potencial y las limitaciones de estos sistemas. Se han seleccionado, tanto los parámetros, como los rangos entre los que se quiere estudiar el impacto que tienen estos factores en la respuesta del sistema como elemento activo, distinguiendo los parámetros de diseño, vinculados a la definición de la solución, de los ambientales, sujetos a las condiciones exteriores variables.

Para llevar a cabo el análisis de alternativas, se considera que la fórmula idónea a adoptar es desarrollar un estudio paramétrico en el que, partiendo de un diseño de referencia, se modifican los parámetros de forma independiente para cuantificar el impacto al cambiar cada factor. Para ello, en el capítulo anterior se ha analizado la posibilidad de desarrollar un modelo teórico analítico basado en la información existente en la bibliografía y las experiencias previas en este ámbito.

Como conclusión, se ha considerado que desarrollar un modelo por CFD aporta ventajas frente al modelo analítico en términos de cálculo, a la vez que proporciona una mayor flexibilidad para considerar múltiples y variadas combinaciones para estudiar diferentes alternativas. El hecho de contar con una implantación y una serie de prototipos que permiten para el sistema que se quiere analizar, conjunto para el que se ha definido y monitorizado una campaña experimental como parte de la presente tesis, con el objetivo de evaluar las prestaciones del sistema en condiciones reales de uso, ha supuesto un argumento más a favor del enfoque propuesto puesto que se plantea validar el modelo CFD con los datos que se han medido en la campaña experimental.

El objetivo de este tercer capítulo es definir, desarrollar y validar el modelo CFD para estudiar la fachada activa propuesta, para a continuación, llevar a cabo el estudio paramétrico planteado, permitiendo así valorar y analizar las soluciones alternativas al diseño de referencia. El estudio se completa con una caracterización del sistema de referencia a través de sus curvas de rendimiento, para poder así establecer una comparativa con soluciones similares identificadas y contextualizar el desarrollo.

En este caso, el estudio toma en consideración el sistema de fachada de forma aislada y únicamente se considera el circuito solar para proceder con la validación del modelo. El estudio pormenorizado del circuito solar, así como su interacción con el resto de los elementos y sistemas de climatización serán posteriormente analizados en el capítulo IV, concretamente para un sistema combinado con una bomba de calor, con el fin de extender el análisis de las fachadas activas en el entorno en el que se pretenden integrar.

Finalmente, destacar que las investigaciones desarrolladas y presentadas en este Capítulo III han sido publicadas en revistas internacionales de reconocido prestigio [233], [234], [235].

# 2. MODELADO PARA REALIZAR EL ANÁLISIS PARAMÉTRICO

Tal y como se ha descrito en el apartado 5 del capítulo II de la tesis, la eficiencia es el principal parámetro que caracteriza el comportamiento de un colector térmico y será por tanto el criterio principal para evaluar las diferentes alternativas. El segundo factor de interés será el que determine la energía útil ($Q_u$) que se puede obtener del conjunto para poder así considerar las aplicaciones prácticas de una fachada como la propuesta. Las ecuaciones básicas que definen estos dos parámetros, eficiencia y energía útil, son las indicadas a continuación [236]:

$$\eta = \frac{Q_u}{A_c\, I_{sol}} \tag{17}$$

$$Q_u = \dot{m}\, C_w\, (T_{out} - T_{in}) \tag{18}$$

El objetivo del modelo será por tanto cuantificar estos dos factores para poder así valorar las prestaciones del sistema a las alternativas planteadas.

Este sistema ofrece la infraestructura necesaria para investigar la integración de soluciones de aprovechamiento de energía solar térmica en envolventes de edificación. Concretamente, fue instalado y está operativo desde el año 2016 [237] en la fachada sur del edificio experimental KUBIK® de Tecnalia en su sede de Derio [238].

**Figura 59. Paneles instalados en la fachada sur de Kubik® (izquierda). Detalle de los principales componentes del sistema (derecha). [234]**

Se instalaron un total de 6 paneles (3m$^2$ cada uno) en la fachada del edificio (Figura 59 izquierda), contando cada panel con cinco componentes principales (Figura 59 derecha): El panel sándwich con núcleo de poliuretano (2) combinado con dos chapas de acero ranuradas (1, 3). Tubos de nylon (4) instalados en las ranuras de la chapa exterior y una chapa adicional de acero (5) que

actúa como absorbedor. Cada panel tiene seis tubos paralelos conectados mediante unos elementos modulares de conexión incorporados dentro del módulo. Las dimensiones principales del panel estándar son: 3 m de longitud, 1 m de ancho y 80 mm de espesor.

Para el desarrollo del modelo por elementos finitos se plantea utilizar un software que permita una modelización y Cálculo Fluido Dinámico (CFD por sus siglas en inglés), permitiendo valorar el efecto de los parámetros identificados en el capítulo II. Se selecciona el software ANSYS FLUENT que permite la modelización y mallado del conjunto de acuerdo con las necesidades del estudio. Así, los pasos principales a contemplar serán los siguientes:

- Definición del modelo físico a modelar
- Definición de la geometría y del mallado
- Validación del modelo a través de prototipos
- Desarrollo del estudio paramétrico
- Análisis de resultados y conclusiones

En los siguientes apartados se van a detallar las tareas para llevar a cabo para cada una de las etapas planteadas.

## 2.1. Modelo CFD

### 2.1.1. Modelo físico

La función principal del modelo es simular la respuesta del sistema ante el estímulo externo que implica la energía incidente en el absorbedor. Esta energía, que se debe principalmente a la radiación solar, supondrá un aumento de la temperatura de los diferentes componentes. Así, el diseño del colector, tal y como se ha comentado en capítulo II, debería estar orientado a trasladar la mayor cantidad de este calor hasta el fluido para poder así aprovechar esa energía para que el sistema tenga el comportamiento de colector solar esperado.

Por tanto, el modelo deberá estar diseñado para calcular los fenómenos de transferencia de calor dentro de los sólidos y entre los sólidos y el fluido, que representan los dos procesos térmicos principales dentro del colector. Estos efectos, incluyendo las simetrías en ambas caras del modelo, se representan en la Figura 60, así como la cámara de aire cerrada en la parte posterior del panel sándwich, donde sólo se toma en consideración la convección natural.

Para el análisis se han tomado en consideración las siguientes hipótesis de cálculo:

- El coeficiente de transferencia de calor entre el fluido y la tubería es constante
- Hay un contacto perfecto entre la tubería y la chapa de metal circundante, así como en todas las zonas de contacto entre diferentes chapas.
- La parte posterior y los bordes del colector están perfectamente aislados.
- Las propiedades de los materiales son independientes de la temperatura.

Los principales fenómenos físicos de intercambio térmico que se han tomado en consideración en este modelo son:

- La radiación solar incidente como fuente principal de energía que eleva la temperatura del absorbedor.

- La emisión de calor por radiación infrarroja de la superficie del absorbedor hacia el ambiente exterior por diferencia de temperatura.
- La convección natural hacia el aire exterior y la convección forzada debido al efecto del viento.
- La conducción entre sólidos en contacto directo.
- La convección entre la pared de la tubería y el fluido que circula por el interior.
- La convección entre la chapa posterior (chapa nº3 en la Figura 60) y la cámara de aire cerrada que se genera entre la fachada activa y el muro soporte.

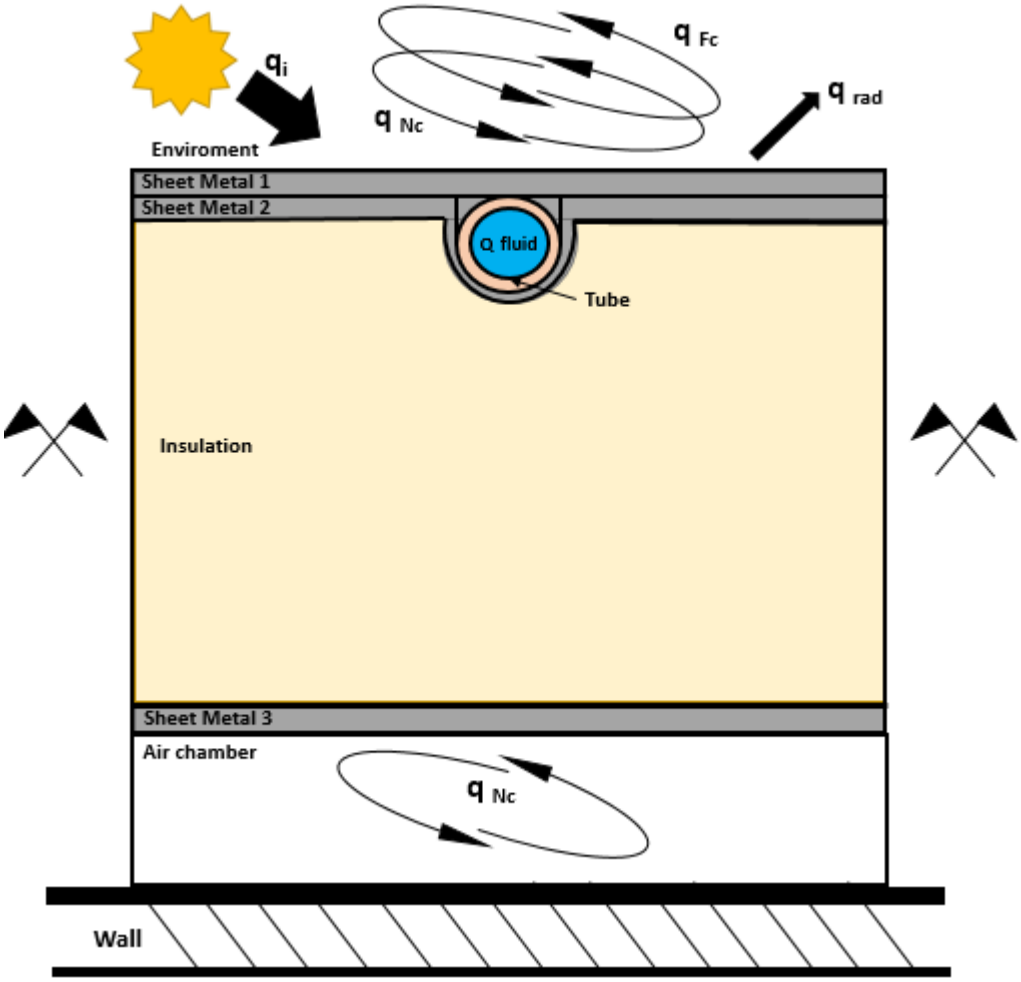



**Figura 60. Fenómenos térmicos considerados en el modelo. [233]**

Como resultado de la simulación, la ganancia de temperatura del fluido cuando pasa a través de la tubería por el eje longitudinal representará la energía capturada por el sistema (ecuación (7)), con la que se podrá calcular a su vez el rendimiento (ecuación (6)).

Para la radiación incidente, ($q_i$), se modela un "flujo de calor" [239], por lo que el calor absorbido por la superficie expuesta del colector será igual a la radiación solar ($I_{sol}$) por la absortividad de la superficie ($\alpha$). Por tanto, la energía absorbida por unidad de superficie se obtiene mediante la expresión:

$$q_i = \alpha \, I_{sol} \tag{19}$$

La radiación emitida al ambiente ($q_{rad}$) por la chapa expuesta es el resultado de combinar la emisividad (ε) y la constante de Stefan Boltzmann (σ) y es también función de la diferencia de temperatura entre la superficie de la chapa de acero, que hace las veces de absorbedor, y la temperatura del firmamento ($T_{sky}$) hacia la que emite radiación esa chapa que está a una cierta temperatura ($T_s$).

$$q_{rad} = \varepsilon \, \sigma \left(T_{sky}^4 - T_s^4\right) \tag{20}$$

$$q_{n,c} = h_{W,n} \left(T_{amb} - T_s\right) \tag{21}$$

$$q_{f,c} = h_{W,f} \left(T_{amb} - T_s\right) \tag{22}$$

El calor del cuerpo se transmite también al aire por convección natural (ecuación (21)) y por convección forzada (ecuación (22)) [240], de forma proporcional a la diferencia de temperaturas entre la superficie de la chapa y el ambiente exterior. Tomando la velocidad del viento como el criterio principal para el modelo que se está desarrollando, se puede utilizar un coeficiente convectivo combinado ($h_w$) que integre el efecto natural y el convectivo.

El efecto del viento en el fenómeno de convección de las fachadas de los edificios, así como en la superficie expuesta de los colectores, es un ámbito en el que se han desarrollado numerosos estudios y existen diferentes expresiones para estimar el factor convectivo. Con el fin de seleccionar el parámetro $h_w$ que mejor se adapte al caso de estudio, se han analizado diferentes correlaciones de acuerdo con las alternativas disponibles en la bibliografía [241].

Para llevar a cabo la validación del modelo, que se presentará más adelante en el apartado 3.2, se tomarán en consideración tres alternativas para velocidades del viento menores que 5 m/s. Estas tres correlaciones en función de la velocidad del viento (U), son las que se describen en las ecuaciones (23) a (25).

$$h_W = 2{,}8 + 3 \, U \quad \text{[242]} \tag{23}$$

$$h_W = 5{,}7 + 3{,}8 \, U \quad \text{[243]} \tag{24}$$

$$h_W = 8{,}55 + 2{,}56 \, U \quad \text{[244]} \tag{25}$$

Por tanto, el calor total que cede la superficie al aire exterior en contacto con la chapa se puede calcular como una condición de contorno mixta que combina convección y radiación [245]:

$$q_{air} = h_w \left(T_{amb} - T_s\right) + q_{rad} \tag{26}$$

La convección en la chapa interior en contacto con la cámara de aire cerrada es un efecto que se considerará exclusivamente para la evaluación del material aislante (Sección 4.1.1), ya que este efecto de convección únicamente es significativo en aquellos casos en los que el espesor y cantidad aislamiento es reducido y por tanto, cuando los fenómenos que ocurren en las chapas exteriores influyen en la chapa interior y en la cámara de aire que está en contacto con esta. Para el resto casos, se considerará una pared adiabática, ya que la relación térmica entre la superficie exterior en donde se encuentra el absorbedor y la superficie interior se pueden analizar de forma desacoplada gracias al efecto de desconexión térmica proporcionado por el aislamiento.

Para el cálculo de la transferencia de calor se utilizó un *solver* de cálculo basado en la presión. El algoritmo utilizado para discretizar la presión fue el SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations) y SECOND ORDER UPWIND para resolver el momento y la ecuación de la energía. La transferencia de calor por convección entre el fluido y las diferentes zonas se resolvió mediante el acople de las ecuaciones del momento y de la energía.

El número de Prandtl viene dado por la ecuación (27), donde $C_w$ representa el calor específico, $\mu$ la viscosidad y $\lambda_f$ la conductividad térmica del fluido. Se considerará un número de Prandtl de 6,9 para el agua.

$$Pr = \frac{C_w \, \mu}{\lambda_f} \tag{27}$$

El número de Reynolds para el flujo a través del tubo queda descrito en la ecuación (28). Siendo V la velocidad del fluido, $D_i$ el diámetro hidráulico y $\mathcal{V}_k$ la viscosidad cinemática. El número de Reynolds resultante al desarrollar el cálculo (26.485), representa un flujo turbulento (Re ≥ 4.000).

$$Re = \frac{V * D_i}{\mathcal{V}_k} \tag{28}$$

Por tanto, para la descripción numérica del comportamiento del fluido en el modelo se tomará en consideración el modelo de turbulencia estándar k-ε. En estas condiciones se pueden considerar las ecuaciones de *Reynolds-Averaged Navier-Stokes* (RANS) para la capa límite en conductos circulares lisos.

Para la ecuación de energía se consideró la transferencia de calor por conducción descrita por la ley de Fourier. Siendo $h_f$ el factor de convección entre tubo y fluido y $T_f$ y $T_p$ las temperaturas del fluido y de la pared del tubo respectivamente. El flujo de calor absorbido por el fluido que se transfiere de la pared del tubo al fluido, $q_f$, se puede describir mediante la ecuación:

$$q_f = h_f \, (T_f - T_p) \tag{29}$$

El modelo se define de tal forma que, a través de un cálculo en condiciones estacionarias, simule los efectos de transferencia de calor que se han descrito, dando como resultado la temperatura de salida ($T_{out}$) y la temperatura superficial del absorbedor en la chapa exterior ($T_s$). Con $T_{out}$ se podrá calcular la energía ($Q_u$) obtenida en el panel como la diferencia entre las temperaturas de entrada ($T_{in}$) y salida ($T_{out}$) para un caudal determinado (ecuación (7)). Combinando las ecuaciones (6) y (7), se puede calcular el rendimiento del colector solar mediante la ecuación (30). Así, dependiendo de la resolución temporal en los datos de entrada, se pueden estimar rendimientos instantáneos, horarios o medias diarias entre otros.

$$\eta = \frac{\dot{m}\, C_w\, (T_{out} - T_{In})}{I_{sol}\, A_c} \tag{30}$$

### 2.1.2. Geometría y mallado

El esquema de la configuración adoptada para definir en 3 dimensiones un modelo representativo del panel activo con sus principales componentes, es el que se muestra en la Figura 61. Se trata de una porción limitada pero suficiente para poder describir y simular el conjunto.

El modelo cuenta con una sección representativa de la combinación del panel con el circuito hidráulico, siendo las dimensiones de la muestra de 160 mm de ancho, 82,1 mm de alto y 100 mm de largo. Para ello se definen dos chapas en su cara exterior, una el absorbedor (Abs) y otra la chapa exterior ($Ch_e$) que aloja el circuito hidráulico. Entre estas dos, se dispone el conducto (Tu) por el que circula el fluido. En la cara posterior se presenta una chapa interior ($Ch_i$) y el material aislante (Ais) es el que separa las chapas exteriores de las interiores.

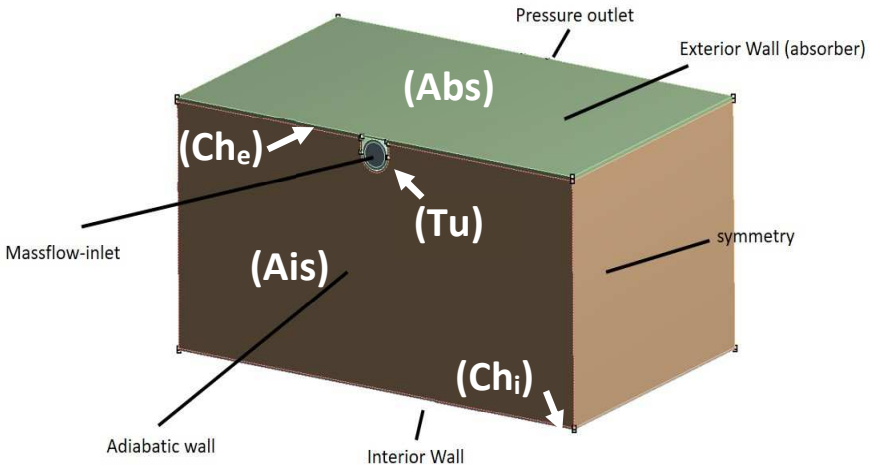



**Figura 61. Sección representativa y condiciones de contorno en el dominio. [234]**

En el modelo se representa el fluido que lo atraviesa a través de una entrada de caudal másico y una salida de presión. La condición de simetría se fija en las caras que discurren paralelas al conducto siendo adiabáticas las perpendiculares. Todos estos parámetros quedan explicitados como condiciones de contorno para los diferentes dominios en la Figura 61.

La definición de la malla para el cálculo por elementos finitos se definió buscando minimizar el esfuerzo computacional sin afectar a la precisión. La geometría fue dividida en cuatro dominios: tubos, chapas metálicas, aislamiento y fluido. Las zonas entre chapa y tubo están malladas mediante elementos hexaédricos, con un mayor refinamiento en las zonas de contacto donde el fenómeno de transferencia de calor es más acusado (Figura 62). El fluido y el aislamiento se mallaron mediante elementos tetraédricos, aplicando en el dominio del fluido una capa límite para poder capturar los efectos viscosos.

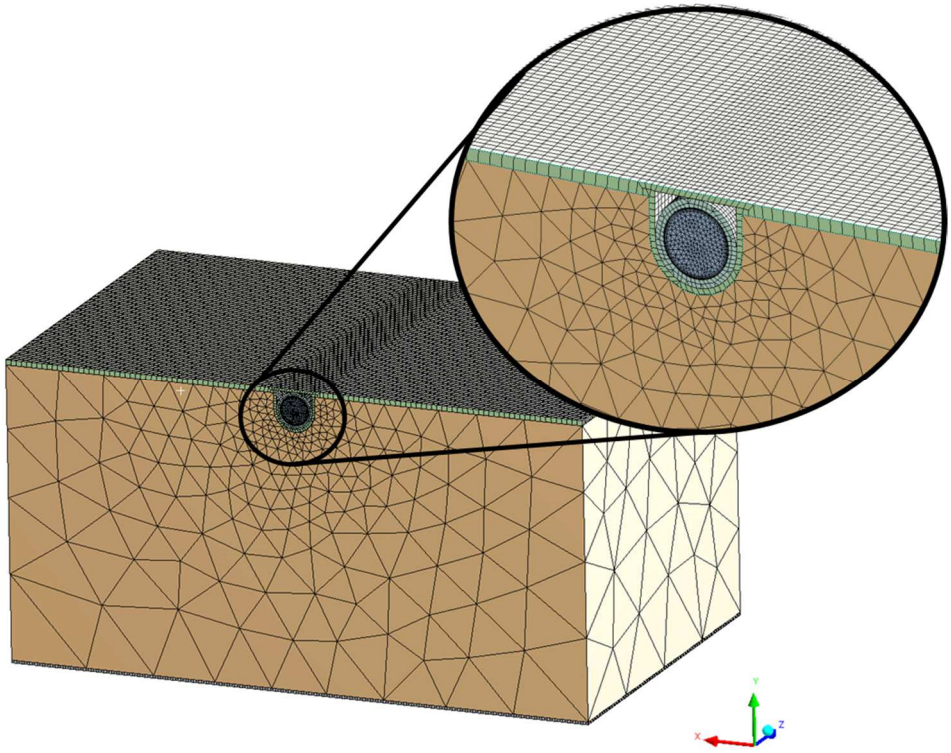


**Figura 62. Mallado del modelo y detalle en el encuentro entre tubo, chapas y aislamiento donde se aprecia el factor de crecimiento. [233]**

Con el objetivo de reducir el error computacional se realizó un análisis de sensibilidad de la malla, con diferentes niveles de refinamiento, empleando valores experimentales de $T_{out}$ como referencia a modo de validación. Para ello, se consideró, a modo de contraste, uno de los días monitorizados en la campaña experimental (ver apartado 0). En la Figura 63 se muestran las diferencias entre los resultados medidos durante el 18 de junio de 2017 y los simulados para tres niveles de mallado diferentes en los que se incrementa el número de celdas.

Se calculó el "Error Absoluto Medio Previsto" (PMAE) [246] para estas tres estrategias alternativas de refinamiento de malla. Los resultados se presentan en la Tabla 21. Las mallas 1, 2 y 3 con las que el número de celdas se va incrementando, mostraron un error de 7,25 %, 3,40 % y 0,85 %, respectivamente. Como conclusión se seleccionó la "malla 1" por su elevada precisión frente al coste computacional.

| Malla (número de celdas) | PMAE (%) |
|---|---|
| Malla 1 (509.385) | 0,81 |
| Malla 2 (361.407) | 3,81 |
| Malla 3 (284.584) | 7,17 |

**Tabla 21. Predicción del Error Absoluto Medio (PMAE) para el estudio de sensibilidad de la malla**

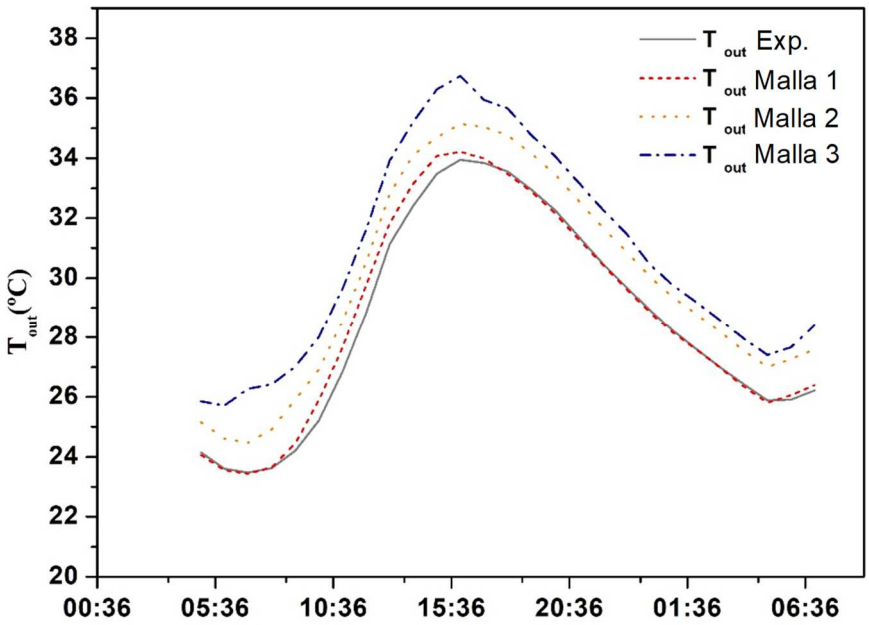



**Figura 63. Resultados del $T_{out}$ calculado con tres mallas distintas. [233]**

### 2.1.3. Escalado del modelo

La configuración en paralelo del prototipo de fachada activa se resolvió como un colector en el que los conductos contiguos quedan conectados a través de un elemento de conexión perpendicular en la parte superior e inferior del panel a modo de colector hidráulico. Este diseño permite simplificar el sistema a una sección de 100 mm de largo x 160 mm de ancho que cuenta con un único tubo. Los conectores superior e inferior proporcionan un flujo uniforme al resto de conductos y representan un área pequeña en comparación con la superficie completa del colector, por lo que pueden ignorarse en el cálculo [233]. La condición de simetría en las caras laterales permite la consideración de múltiples conductos y, en consecuencia, el ancho de la sección determinará la distancia entre tuberías paralelas y el área de influencia que cada tubo tiene para captar el calor del absorbedor (Figura 64).

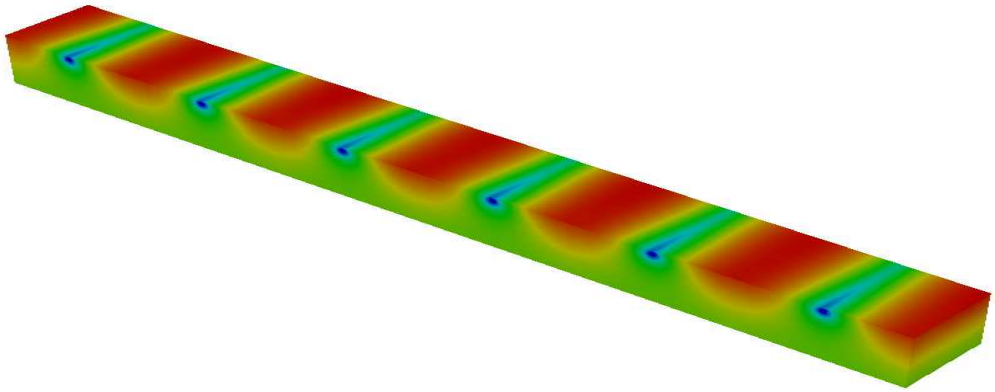


**Figura 64. Representación de la simetría para generar múltiples conductos paralelos en el modelo. [233]**

Por otro lado, se pueden calcular diferentes longitudes de panel variando la longitud del modelo. Adoptando como asunción un mismo tiempo de resistencia hidráulica (τ), se puede emplear el mismo modelo para el cálculo del rendimiento del panel independientemente de la longitud de este, tal y como se representa en ecuación (31) la Figura 65.

$$\tau_1 = \tau_2 \tag{31}$$

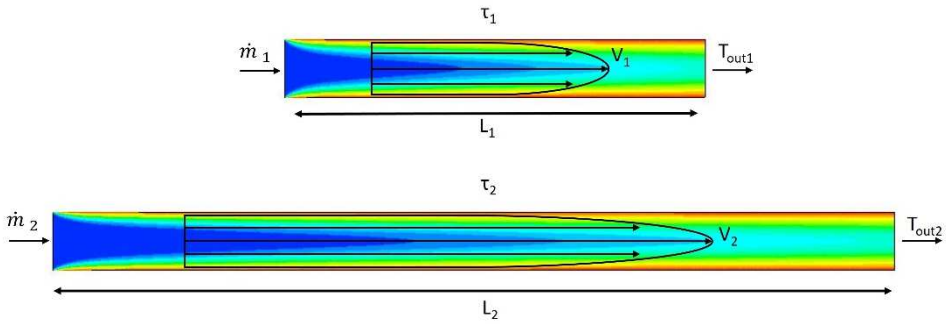



**Figura 65. Representación de tubos de diferente longitud modelados con un flujo equivalente. [233]**

Por tanto, se calcula un tiempo de residencia hidráulico para una longitud objetivo de acuerdo con la ecuación (31) y combinando las ecuaciones (31) a (33), se puede calcular un flujo de masa equivalente para el panel con longitud diferente y misma sección de tubo, tal y como se expresa en la ecuación (34).

$$\tau = \frac{L}{V} \tag{32}$$

$$V = \frac{\dot{m}}{S} \tag{33}$$

$$\dot{m}_1 = \frac{L_1 \dot{m}_2}{L_2} \tag{34}$$

Con las consideraciones planteadas para representar múltiples tubos paralelos en el eje perpendicular al mismo (eje X en la Figura 62) y para variar, a través del flujo, la longitud del panel en el eje principal del panel (eje Z en la Figura 62), se pueden simular diferentes dimensiones del sistema a través de la sección mínima descrita (Figura 61), lo que implica a su vez una optimización del modelo en términos de tiempo de computación.

# 3. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DEL MODELO

## 3.1. Infraestructura experimental e instalación piloto

Como parte de la fase de demostración del proyecto de investigación colaborativa, formado por un consorcio europeo, BASSE [247], se realizó una inversión para dotar de los recursos tecnológicos necesarios al programa de investigación asignado a Tecnalia. El principal resultado de este desarrollo consistió en la instalación de un sistema de paneles activos en la fachada del edificio experimental Kubik® de Tecnalia en Derio, Bizkaia, una localización que recibe una radiación horizontal promedio anual de 1,300 kWh/m$^2$ de media [248]. En las últimas fases de este proyecto de investigación, se llevaron a cabo diversas pruebas de integración de los componentes, puesta en marcha y programación de la operación. Como resultado se monitorizó el sistema en funcionamiento durante 4 meses en 2016. Se instalaron un total de 6 paneles activos de 3 m$^2$ cada uno dispuestos en vertical y orientados al sur en la envolvente exterior del edificio Kubik®, tal y como se muestra en la Figura 66.

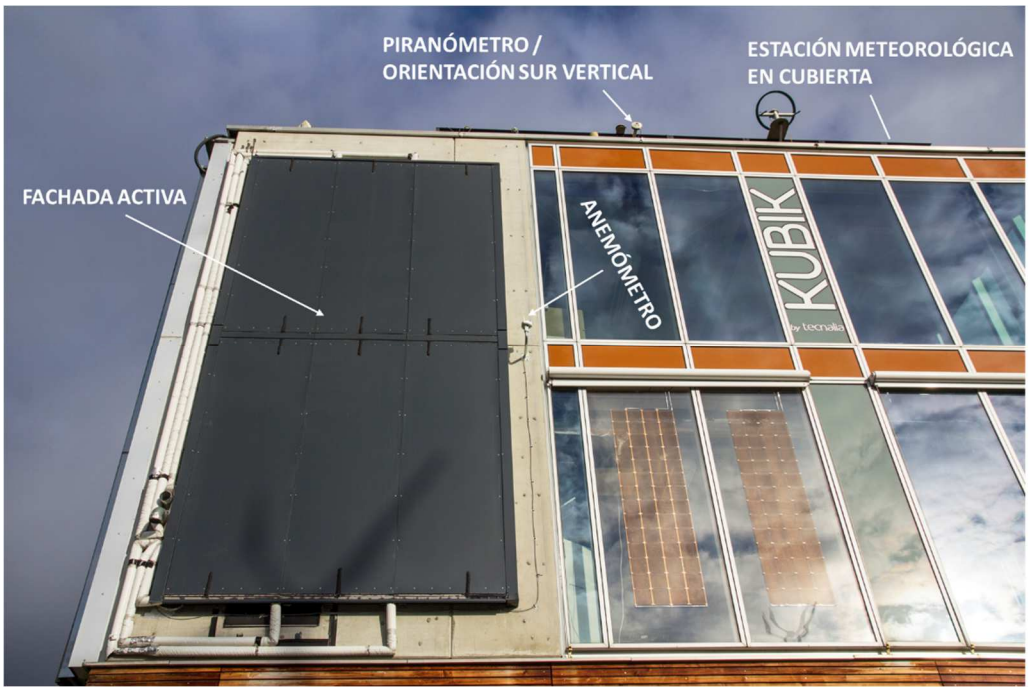



**Figura 66. Paneles activos instalados en la fachada sur del edificio Kubik®. [233]**

Una vez finalizado el proyecto de desarrollo BASSE, como parte de la investigación vinculada a la presente tesis y, con el fin de profundizar en el comportamiento del sistema, se diseñaron, desarrollaron y analizaron dos campañas experimentales completas durante los años 2017 y 2018. El objetivo fundamental de estas dos campañas, de una extensión muy superior a la obtenida durante la ejecución del proyecto, es el de ampliar de forma significativa el conocimiento adquirido en esas pruebas preliminares que no permitieron un análisis en detalle del conjunto y del potencial del mismo.

Por tanto, el planteamiento experimental de la tesis persigue ese análisis pormenorizado del sistema para valorar alternativas al diseño de fachada solar activa, comprender mejor las

ventajas y limitaciones del sistema completo cuantificando y contrastando el rendimiento y producción del sistema y, en definitiva, ampliar el grado de comprensión de este.

El detalle y definición de las pruebas y experimentación llevadas a cabo queda recogido y descrito en mayor profundidad en el siguiente capítulo IV. No obstante, y, dado que una parte de los datos monitorizados se van a emplear para la validación del modelo desarrollado en este capítulo III, se presenta brevemente en esta sección la forma en la que se estructuraron dichas pruebas, el alcance de estas, y la forma en la que se van a aprovechar en el desarrollo de la tesis.

Las diferentes pruebas realizadas con el equipamiento experimental se pueden resumir en tres grandes bloques en función de cuando se llevaron a cabo:

- Año 2016: 4 meses de monitorización dentro del proyecto BASSE. Marzo – Junio 2016. Primera puesta a punto, pruebas funcionales y primeros resultados del sistema combinando fachada solar y bomba de calor. Estos resultados no se consideran para el desarrollo de la tesis.
- Año 2017: 10 meses de monitorización. Marzo – Diciembre 2017. Pruebas de análisis centradas principalmente en la fachada activa. Experimentación orientada a dos aspectos fundamentales de la tesis doctoral: Validación experimental del modelo, presentada en el presente Capítulo III y datos en condiciones reales de funcionamiento para la fachada activa desacoplada descritos en el siguiente Capítulo IV.
- Año 2018: 8 meses de monitorización. Enero – Agosto 2018. Experimentación principalmente orientada a la caracterización del sistema combinado de fachada activa acoplado a la bomba de calor (Capítulo IV).
  En el último mes de esta campaña, durante el mes de Agosto, se desarrollan pruebas complementarias para el análisis de la fachada activa (como las desarrolladas durante el 2017), que son de interés para la validación del modelo que se presenta en este capítulo III.

| Campaña | Periodo | Descripción | Utilidad en la tesis doctoral |
|---|---|---|---|
| 2016 | (4 meses) Marzo – Junio | Primeras pruebas funcionales y puesta en marcha del sistema.<br>Obtención de primeros datos experimentales. | No se utiliza. Se consideran algunos resultados de referencia para establecer valores de configuración. |
| 2017 | (10 meses) Marzo – Diciembre | Experimentación con la fachada activa desacoplada.<br>Pruebas de análisis para caracterización del sistema activo. | Validación del Modelo: Capítulo III – Apartado 3.2<br>Curvas características: Capítulo III – Apartado 5.1<br>Caracterización de la fachada: Capítulo IV |
| 2018 (1) | (7 meses) Enero – Julio | Experimentación del sistema acoplado.<br>Combinación de fachada activa con bomba de calor.<br>Pruebas de análisis de funcionamiento del conjunto. | Caracterización del sistema combinado: Capítulo IV |
| 2018 (2) | (1 mes) Agosto | Experimentación con la fachada activa desacoplada.<br>Pruebas complementarias para el análisis y caracterización del sistema activo. | Validación del Modelo: Capítulo III – Apartado 3.2<br>Caracterización de la fachada: Capítulo IV |

**Tabla 22. Detalle de las diferentes campañas experimentales desarrolladas durante los años 2016, 2017 y 2018 y su aplicación en el desarrollo de la tesis**

La Tabla 22 resume la descripción de las campañas experimentales comentadas, así como la aplicación de los datos obtenidos para el desarrollo de la tesis. En este caso se pone principalmente de manifiesto la experimentación que es de interés para el contenido y desarrollo descrito en el actual capítulo III.

La información recabada en la campaña de 2017 es la que principalmente se va a emplear en el estudio actual para validar el modelo con el comportamiento real del panel, por lo que se seleccionarán una serie de días específicos de estudio. De forma complementaria los días de agosto identificados como campaña 2018 (2) proporcionarán información adicional de interés para desarrollar la validación.

Cabe destacar que, para la validación del modelo se considerarán únicamente los componentes principales del circuito solar, por lo que los otros componentes del sistema completo, como la bomba de calor o equipos accesorios que se tratarán más adelante en el siguiente capítulo IV de la tesis, quedarán excluidos para los análisis presentados en este capítulo III.

EL circuito solar considerado en este caso cuenta con los siguientes componentes principales: la fachada activa (6 paneles), el tanque de almacenamiento (285 litros), el sistema de distribución, la bomba de circulación y los equipos de medida. La descripción completa del circuito solar se muestra en la Figura 67. La configuración de la fachada activa se dispuso combinando parejas de paneles en serie (conectando el panel inferior con su inmediatamente superior) para configurar baterías de 6 m de largo. Estas baterías de dos paneles, tres en total, se conectaron en paralelo entre sí, tal y como se aprecia en el esquema hidráulico de la Figura 67.

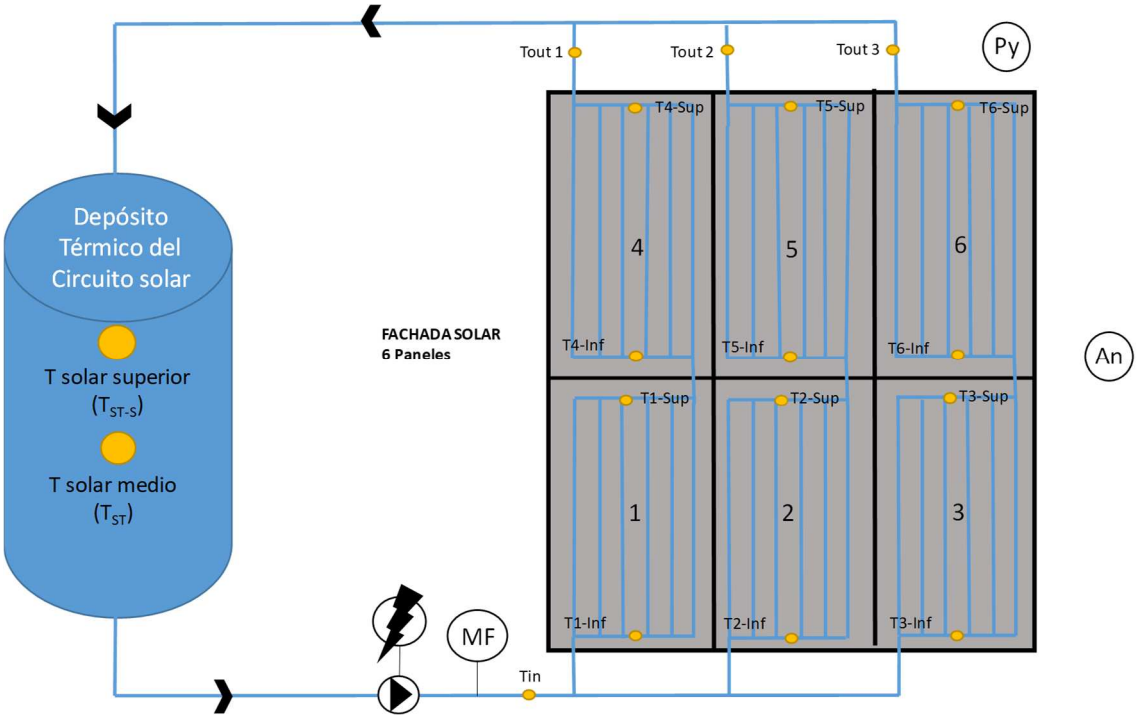



**Figura 67. Diagrama para el circuito solar instalado y descripción de los componentes principales. [233]**

El sistema de medida está compuesto por diferentes dispositivos de monitorización, tal y como describe en la Tabla 23. Se disponen un total de 12 sensores de temperatura están ubicados en la superficie exterior de los paneles (2 por panel en posición superior e inferior), para

monitorizar la temperatura media de la chapa que hace las veces de absorbedor ($T_s$). Otros dos sensores se colocan en diferentes alturas del tanque de acumulación ($T_{ST}$ y $T_{ST-S}$) y se dispone de 4 sensores para la temperatura del fluido con una entrada común ($T_{in}$) y tres temperaturas de salida ($T_{out}$) para cada batería. Un caudalímetro (MF) registra el flujo másico ($\dot{m}$), el piranómetro (Py), la radiación ($I_{sol}$) en la orientación sur vertical, una estación meteorológica en cubierta es utilizada para la temperatura ambiente exterior ($T_{amb}$) y el anemómetro (An) registra velocidad (U) y dirección del viento.

| Parámetro | Dispositivo de medida | Tipo/Modelo | Incertidumbre |
|---|---|---|---|
| Temperatura Superficial ($T_s$) – (°C) | RTD – PT100 | Thermo Sensor GmBH | ±0,1 ºC |
| Temperatura del fluido en los conductos y en el tanque del circuito solar ($T_{in}$), ($T_{out}$), ($T_{ST}$), ($T_{ST-S}$) – (°C) | RTD – PT100 | Thermo Sensor GmBH | ±0,1 ºC |
| Caudal másico ($\dot{m}$) – (l/min) | Caudalímetro ultrasónico | Kamstrupp Ultraflow Multical 801 | ±0,0132 l/seg |
| Radiación ($I_{sol}$) – (W/m$^2$) | Piranómetro | Kipp & Zonen CMP – 6 | ± 5 % |
| Velocidad del viento (U) – (m/s) | Anemómetro | Vaisala WXT520 | ± 3 % |
| Temperatura ambiente ext. ($T_{amb}$) – (°C) | RTD – PT100 | Vaisala WXT520 | ± 0,3 ºC |

**Tabla 23. Relación de equipamiento experimental empleado para la monitorización**

La incertidumbre individual de cada uno de los parámetros de medida que viene descrita en la Tabla 23, es un factor que queda definido por cada uno de los dispositivos de medida empleados y tendrán influencia en la incertidumbre acumulada para los principales parámetros calculados que se emplean para el estudio método. El método de la suma de las raíces cuadradas (*Root Sum Square – RSS*) [249], [250] se utilizó para estimar la incertidumbre combinada en los parámetros calculados. Concretamente se empleó la siguiente expresión:

$$u_{yo} = \sqrt{\left(\frac{\delta y}{\delta x_1}\, u_{x1}\right)^2 + \cdots + \left(\frac{\delta y}{\delta x_n}\, u_{xn}\right)^2} \tag{35}$$

Siendo $u_y$ la incertidumbre global para cada parámetro principal calculado (y), y $u_x$ los errores individuales, de los parámetros medidos (x).

La diferencia de temperatura ($T_{out}$ - $T_{in}$) se ve afectada por la entrada y salida de temperatura en el colector. Esta diferencia de temperatura combinada con el flujo másico influye en la producción de energía ($Q_u$) según se ha descrito en la ecuación (7), mientras que la energía, cuando se divide por la radiación (ecuación (30)), representa el rendimiento (η). Las incertidumbres resultantes para los parámetros calculados son 0,48 % para la diferencia de temperatura, 7,83 % para $Q_u$ y 9,29 % para η.

## 3.2. Investigación y validación experimental del modelo

La definición inicial del modelo consiste en representar el diseño específico de fachada activa tal y como fue construida e instalada en el edificio experimental Kubik®. Para llevar a cabo la primera validación del modelo, del conjunto de 6 paneles se tomará en consideración en primer lugar una batería con 2 paneles conectados en serie tal y como se ha descrito en el apartado previo (Figura 67). En una segunda verificación posterior presentada también en este apartado, se amplía el número de paneles hasta los 6 existentes para conseguir un mayor contraste y fiabilidad de la validación. Los parámetros que definen el primer caso de la batería con 2 paneles y 6m$^2$ de fachada activa se indican en la Tabla 24.

Los parámetros medidos experimentalmente $I_{sol}$, $T_{amb}$, $T_{in}$, U y $\dot{m}$ son empleados como datos de entrada al modelo. Los valores registrados en intervalos de 1 minuto son agrupados en ciclos horarios con el fin mitigar el efecto de posibles fenómenos transitorios, a la vez que se puede representar el rendimiento del colector de una forma dinámica en diferentes períodos del día con resolución suficiente.

| **Parámetro** | **Material / Valor** |
|---|---|
| Material de las chapas | Acero ($\lambda_s$ = 50 W/mK) |
| Espesor de chapa ($e_s$) | 0,7 mm |
| Absortividad de la chapa ($\alpha$) | 0,8 |
| Dimensiones del panel | 6 m longitud / 1m ancho / 82,1mm espesor |
| Material aislamiento | Poliuretano ($\lambda_i$ = 0,025 W/mK) |
| Espesor de aislamiento ($e_i$) | 80 mm |
| Material del tubo | Nylon ($\lambda_p$ = 0,25 W/mK) |
| Diámetro interior de tubo ($D_i$) / espesor de pared ($e_p$) | 8 mm / 1 mm |
| Profundidad del tubo frente al absorbedor ($D_e$) | 0 mm |
| Espaciado entre tubos paralelos ($D_p$) | 160 mm |
| Fluido | Agua |
| Caudal ($\dot{m}$) | 8 l/min |

**Tabla 24. Configuración inicial del modelo con los parámetros que definen el caso de referencia**

$T_{amb}$, $T_{in}$ y $\dot{m}$ son entradas directas, mientras que la radiación se transforma en un flujo de calor (ecuación (19)) y la velocidad del viento se utiliza para estimar el coeficiente de transferencia de calor ($h_W$). Las tres posibles correlaciones de $h_W$ descritas en las ecuaciones (23) a (25) se calcularon para un día específico (19 de junio 2017 – Campaña 2017 de la Tabla 22) concluyendo que la expresión de Wattmuff et al. [242] es la que mejor representa este efecto en este caso, puesto que tiene el PMAE más bajo = 1,22 % en comparación con los de Test et Al. [244] 1,29 % y McAdams [243] 1,32 %.

A través de la simulación proporcionada por el modelo se pueden obtener los valores para la temperatura de salida del agua y la temperatura del absorbedor durante tres días consecutivos en junio de 2017.

Para obtener el contraste experimental se configuró el circuito solar con un flujo continuo sin interrupción durante todo el período, permitiendo así observar los efectos térmicos dinámicos asociados a la inercia hidráulica del circuito. Las condiciones de trabajo del sistema se estudian

para un modo de funcionamiento en circuito cerrado, por lo que el agua circula por el colector cargando y descargando el tanque (Figura 67), intercambiando energía con el ambiente exterior. En esta situación, no existe una carga térmica específica asociada que extraiga la energía del circuito solar. Así, el sistema se calienta durante el día y se descarga durante la noche siendo el volumen de agua contenido en el circuito y especialmente en el depósito el que proporciona una inercia al sistema para suavizar posibles picos y fenómenos transitorios que se pudieran dar.

Las diferencias entre $T_{out}$ real y simulado durante el enfriamiento nocturno mostraron una mejor coincidencia que durante el calentamiento diurno (Figura 68 superior). Para $T_s$, el efecto es el opuesto, ya que el efecto de calentamiento mostró una mayor similitud entre los valores simulados y medidos (Figura 68 inferior). La variación entre los valores experimentales y simulados durante los tres días resultó en un PMAE de 1,08 % para $T_{out}$ y 4,2 % para $T_s$.

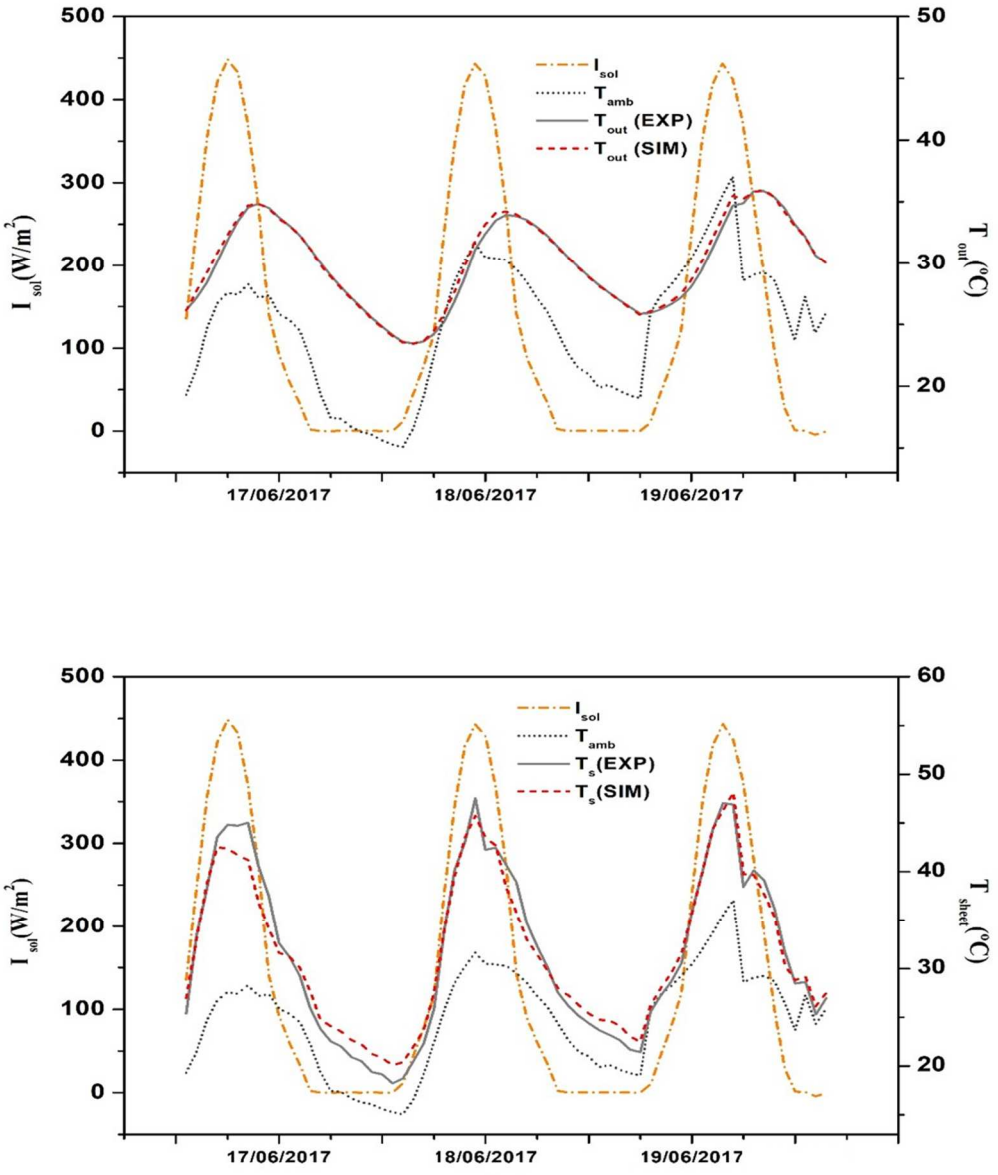



**Figura 68. Validación de los valores simulados para $T_{out}$ (superior) y $T_s$ (inferior) en comparación con los valores experimentales recogidos entre el 17 y 19 de Junio de 2017. [233]**

Uno de los probables motivos por los que se dan estas diferencias en las temperaturas de la chapa es el que se ha identificado en la distribución no uniforme de la temperatura en el caso real, en comparación con un perfil de temperatura homogéneo y continuo estimado por el modelo. En el caso de los datos monitorizados de forma experimental, las temperaturas de la cara exterior tienen una distribución irregular, principalmente debido a que los puntos de contacto entre las chapas, externas e internas, así como los contactos entre tuberías y chapas no son completamente satisfactorios. Para ilustrar este fenómeno, la Figura 69 destaca cualitativamente estas diferencias significativas en varias zonas de la superficie de la fachada, en donde, a pesar de que los sensores registraron un valor promedio de 34,58 °C en ese momento, se aprecian zonas en la zona central con temperaturas 5 °C superiores, mientras que en algunas zonas del contorno la temperatura resulta ser hasta 10 °C inferior.

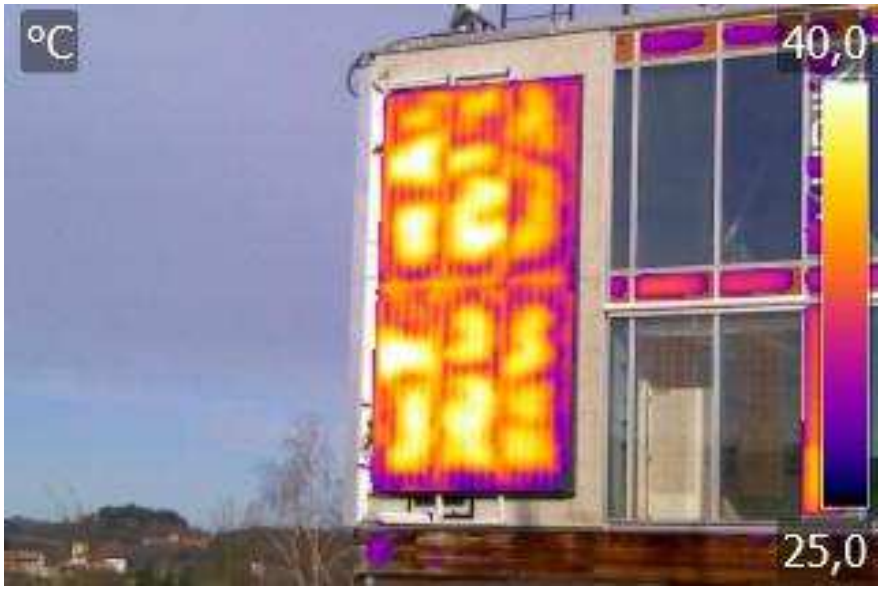



**Figura 69. Termografía de la fachada active con distribución de temperaturas no uniforme. [233]**

A modo de verificación adicional y con el fin de contar con un proceso de validación más amplio, se contrastó también la simulación con la temperatura de salida medida para el conjunto completo de 6 paneles (18 $m^2$ de superficie activa), de tal forma que se obtenía la máxima capacidad de producción de la fachada activa. En este caso, se modificó a su vez el caudal para alimentar las 3 baterías en paralelo, pasando a ser 13,8 l / min frente a los 8 l /min del caso previo indicado en la Tabla 24.

Bajo estas condiciones de superficie máxima y mayor caudal, se analizaron dos días: uno en agosto (Campaña 2018 (2) de la Tabla 22) con mayores temperaturas ambientales (máxima de 29,1 °C) pero menor radiación en el plano de fachada (máxima de 598 $W/m^2$) y otro en diciembre (Campaña 2017 de la Tabla 22) en el que la radiación se incrementa significativamente (máxima de 839 $W/m^2$) y se reduce la temperatura exterior (máxima de 16,8 °C). De esta forma la validación contempla, además de una mayor superficie activa, diferentes condiciones ambientales de funcionamiento en dos días despejados, pero en dos épocas diferentes del año.

La Figura 70 muestra las diferencias entre los valores simulados y los reales durante el día de agosto considerado para la validación y la Figura 71 para el de diciembre. El error entre los

valores simulados y medidos que resulta en estos casos es de un PMAE de 1,43 % y de 2,15 % respectivamente.

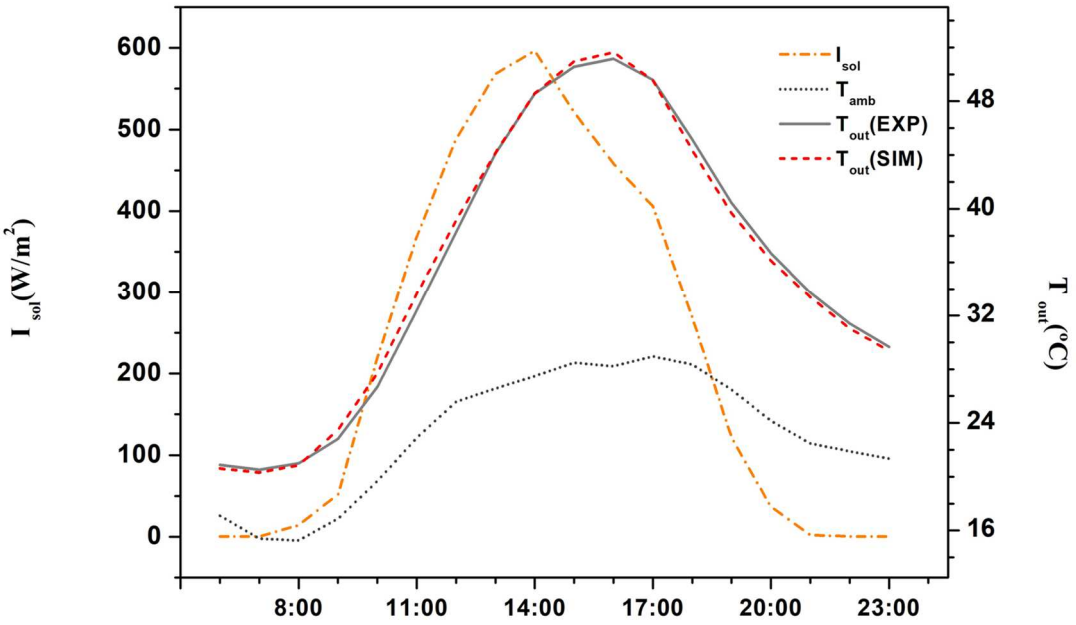



**Figura 70. Validación de los valores simulados para $T_{out}$ comparados con datos experimentales en agosto para una superficie mayor de paneles y un caudal distinto. [233]**

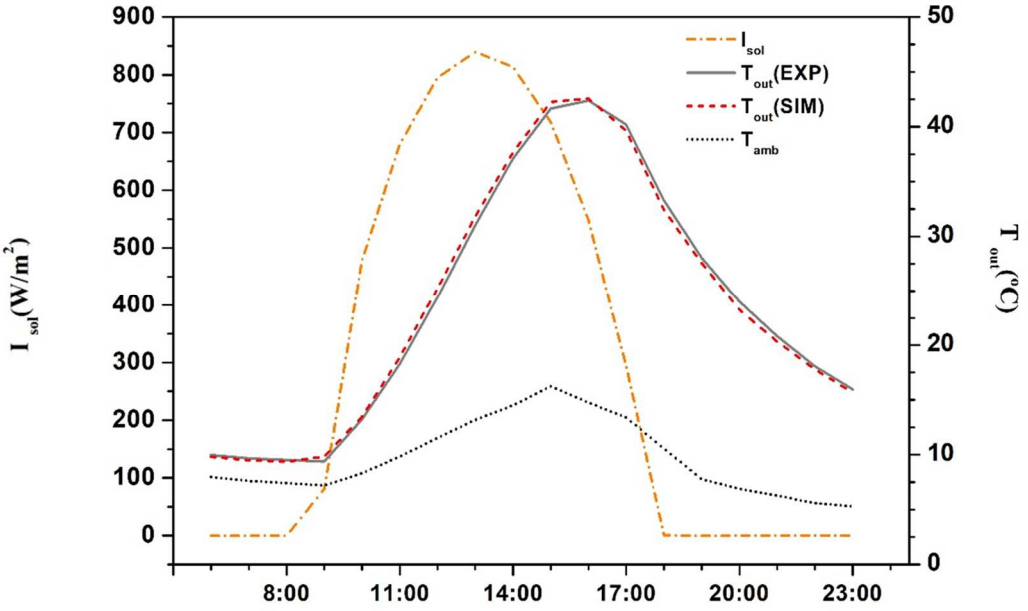



**Figura 71. Validación de los valores simulados para $T_{out}$ comparados con datos experimentales en diciembre para una superficie mayor de paneles y un caudal distinto**

# 4. ESTUDIO PARAMÉTRICO

Una vez se cuenta con un modelo CFD validado experimentalmente, se procede a desarrollar el estudio paramétrico con el fin de valorar alternativas al diseño específico de cada componente de la fachada activa (panel y circuito hidráulico) así como el impacto que las condiciones dinámicas (ambientales y de configuración) tienen en el comportamiento del sistema. El procedimiento consiste en variar uno de los parámetros mientras que el resto permanece invariable. Además, dada la diferente categorización de los grupos de parámetros según lo que se ha descrito en el capítulo II anterior, se procederá de la siguiente forma.

- Para la evaluación de los parámetros de diseño, se establecerán unas condiciones dinámicas ambientales prefijadas con las que se analizarán las diferentes alternativas. Se tomará como referencia las condiciones ambientales externas de un día al final de la primavera (19 de junio de 2017 – Campaña 2017 de la Tabla 22) y el sistema que se toma como base para el contraste es el panel de 6m$^2$ de superficie activa, descrito en la Tabla 23. Este sistema en esas condiciones proporciona un rendimiento del 35,1 % en ese día. Así, se analizará el efecto de variar el diseño del panel y del circuito hidráulico bajo las mismas condiciones exteriores. Es decir, para unas condiciones ambientales definidas, se modificarán los parámetros de diseño indicados en la Tabla 23. En cada paso se analizará el efecto de un único factor y los valores a considerar están recogidos en las siguientes Tabla 26 y Tabla 27.
- Para la evaluación de los parámetros ambientales se procede de forma análoga, dejando fijos los parámetros de diseño y alterando los dinámicos. Esto implica que, al variar las condiciones exteriores de forma independiente entre ellas, no se pueda considerar un día específico que se ajuste a dicho patrón como en el caso anterior en el que las condiciones ambientales quedaban fijadas por los datos monitorizados. Por ello, en este caso se toma como referencia el diseño descrito en la Tabla 23, diseño que queda fijado y para el que no se va a considerar ninguna alteración y se plantean unas condiciones ambientales de partida tal y como se describen en la Tabla 25 siguiente. Así, de acuerdo con lo comentado en el apartado 5.2.2 del capítulo II de la tesis. cada factor indicado en la tabla parte de un valor de referencia y se analiza su evolución entre un valor inferior y un valor superior.

| Parámetros dinámicos ambientales | Valor de Referencia | Límite superior | Límite inferior |
|---|---|---|---|
| Radiación ($I_{sol}$) – (W/m$^2$) | 600 | 100 | 1000 |
| Velocidad del viento (U) – (m/s) | 1,5 | 1 | 6 |
| Temperatura entrada fluido ($T_{in}$) – (°C) | 15 | 10 | 45 |
| Temperatura ambiente exterior ($T_{amb}$) – (°C) | 14 | 5 | 40 |
| Caudal másico ($\dot{m}$) – (kg/s) | 0,13 | 0,04 | 0,2 |

**Tabla 25. Valores de referencia, máximos y mínimos para el estudio paramétrico de los factores dinámicos**

De forma equivalente, tomando los factores y valores indicados en el apartado 5.2.1 del capítulo II, se presentan a continuación la Tabla 26 y la Tabla 27 para los parámetros de diseño del panel y del circuito respectivamente.

| Parámetros de diseño para el Panel | Valor de Referencia | Límite superior | Límite inferior |
|---|---|---|---|
| Espesor de chapa ($e_s$) – (mm) | 0,7 | 2,5 | 0,2 |
| Conductividad ($\lambda_s$) – (W/mK) | 50 | 380 | 0,5 |
| Absortividad del absorbedor ($\alpha$) | 0,8 | 0,96 | 0,1 |
| Espesor aislamiento ($e_i$) – (mm) | 80 | 200 | 30 |
| Conductividad aislamiento ($\lambda_i$) – (W/mK) | 0,025 | 0,015 | 0,05 |
| Ventilación de la cámara | Sin ventilar | Altamente ventilada | Sin ventilar |

**Tabla 26. Valores de referencia, máximos y mínimos para el estudio paramétrico de los factores de diseño asociados al panel**

| Parámetros de diseño para el Circuito Hidráulico | Valor de Referencia | Límite superior | Límite inferior |
|---|---|---|---|
| Conductividad del tubo ($\lambda_p$) – (W/mK) | 0,028 | 0,015 | 0,05 |
| Diámetro interior ($D_i$) – (mm) | 2 | 8 | 16 |
| Pared de tubo ($e_p$) – (mm) | 1 | 3 | 0,5 |
| Distancia entre tubos paralelos ($D_p$) – (mm) | 160 | 240 | 80 |
| Profundidad con chapa exterior ($D_e$) – (mm) | 0 | 15 | 0 |
| Mezcla empleada como fluido calor portador | Agua | Mezcla 3 | Agua |
| Longitud (L) – (m) | 3 | 18 | 3 |

**Tabla 27. Valores de referencia, máximos y mínimos para el estudio paramétrico de los factores de diseño asociados al circuito hidráulico**

Como resultado del estudio paramétrico llevado a cabo se presentan a continuación los resultados del análisis para:

- Efecto de los parámetros de diseño. Distinguiendo entre:
  - Las alternativas a los parámetros de diseño del panel sándwich, considerando chapas metálicas, absorbedor y aislamiento (Tabla 26)
  - Las alternativas a los parámetros de diseño del circuito hidráulico considerando los conductos, su posición relativa y el trazado (Tabla 27)
- Efecto de las condiciones dinámicas tanto ambientales como de configuración (Tabla 25)

## 4.1. Efecto de los parámetros de diseño

Las alternativas al panel sándwich se presentan a continuación en el apartado 4.1.1, mientras que las variaciones en el circuito hidráulico se incluyen en la sección 4.1.2.

### 4.1.1. Alternativas para el panel sándwich

#### 4.1.1.1. Chapas metálicas

La conductividad es una propiedad que se asocia principalmente al tipo de material que se utiliza para resolver las dos chapas externas (Chapas 1 y 2 en la Figura 60). La tercera chapa interna en contacto con la cámara de aire cerrada (Chapa 3 en la Figura 60) no contribuye al rendimiento

térmico del colector. Aunque cabe la posibilidad de plantear combinaciones de materiales distintos en cada chapa para conformar el panel, se va a suponer para el análisis que las tres hojas están compuestas por el mismo material.

El interés principal se encuentra en la chapa exterior que hace las veces de absorbedor, para la que la conductividad es un aspecto clave ya que permite, por un lado, la homogeneización de la temperatura de toda la superficie y, por otro lado, transfiere el calor del absorbedor al circuito hidráulico con una mayor eficiencia.

La conductividad de la chapa metálica y la cantidad de material conductor favorecen al rendimiento, por lo que el espesor será también otro factor importante. De esta forma, una chapa con una alta conductividad, espesor suficiente y una buena superficie de contacto entre sólidos, propiciará un buen fenómeno de conducción entre el absorbedor y el circuito hidráulico.

Para el grosor, las chapas de metal en estas aplicaciones son generalmente delgadas (0,2 a 2,5 mm) en comparación con otros materiales como el hormigón o los polímeros que generalmente requieren más material (5 – 50 mm) para configurar capas continuas. Para la evaluación del espesor, como el sistema de referencia se basa en acero, el rango de valores adoptados considerará los límites que se aplican para el caso de los metales.

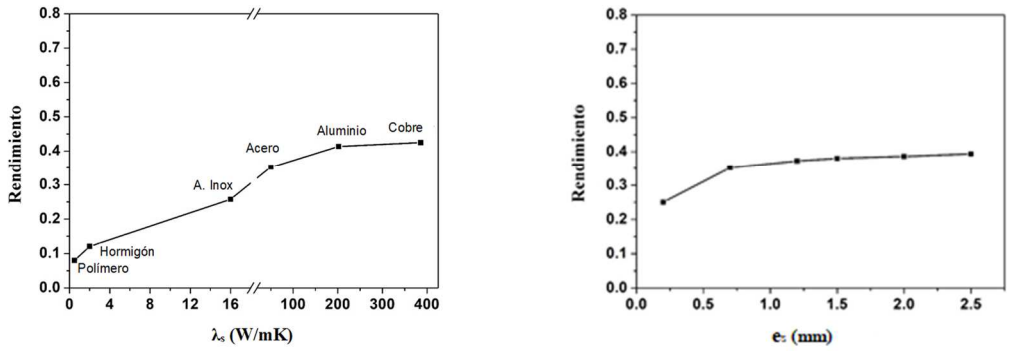



**Figura 72. Estudio paramétrico de la Fachada Activa. Variaciones en el rendimiento para alternativas en la conductividad de las chapas exteriores (izquierda) y el espesor de las chapas (derecha). [233]**

La Figura 72 - izquierda muestra el efecto del aumento de la conductividad térmica de las chapas exteriores, destacando una diferencia significativa entre chapas compuestas por materiales metálicos en comparación con los materiales no metálicos. Dentro de los metales se pueden apreciar también efectos significativos dependiendo del material escogido. El extremo entre aquel que tiene una menor conductividad (polímero) y el de mayor (cobre) representa una diferencia en el rendimiento de hasta un 32 %. Para el caso del espesor de la chapa se puede apreciar una progresión similar (Figura 72 - derecha), aunque los valores superiores a 1 mm representan poca mejora en comparación con el aumento del peso y el material que implican, aspecto que tendrá una incidencia directa en el coste de la solución.

Si se combina el estudio de estas dos variables, conductividad y espesor de la chapa y se analiza el efecto combinado de ambos factores, en el salto térmico que se consigue en el sistema, la siguiente Figura 73. Tal y como se puede apreciar en este caso, el efecto del incremento del espesor de chapa implica la misma progresión para todos los materiales, aunque es más acusada

para aquellos materiales que tienen valores menores de conductividad (< 50 W/mK). Para valores altos (> 200 W/mK), la variación es menos significativa.

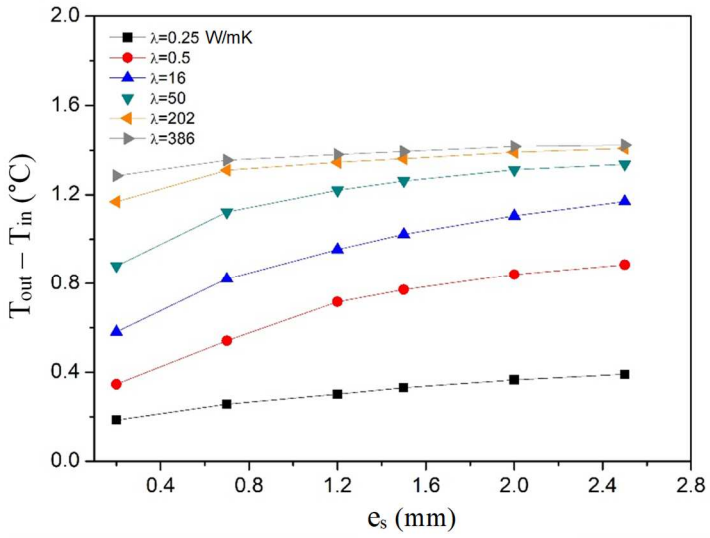



**Figura 73. Estudio paramétrico de la Fachada Activa. Variaciones en el salto térmico para alternativas combinando conductividad y espesor de las chapas exteriores. [234]**

### 4.1.1.2. Absortividad del absorbedor

La absortividad depende tanto del material como principalmente de las propiedades y del tipo de acabado o recubrimiento que se emplee para el absorbedor. La Figura 74 muestra el efecto de la modificación de la capacidad de absorción, destacando así que es uno de los parámetros más influyentes en el rendimiento, con una diferencia del 31 % para el rango de valores analizado. La relación entre $\lambda_s$ y η resulta ser bastante lineal, lo que se debe principalmente a la forma en la que estos dos parámetros quedan relacionados a través de la ecuación (19).

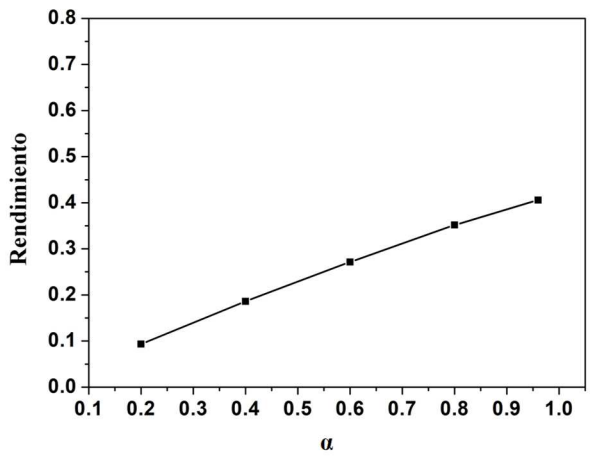


**Figura 74. Estudio paramétrico de la Fachada Activa. Variaciones en el rendimiento para alternativas en la absortividad. [233]**

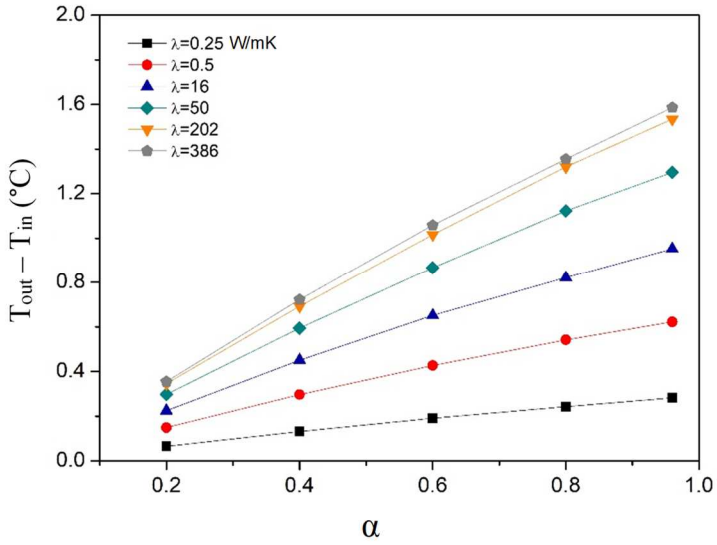



**Figura 75. Estudio paramétrico de la Fachada Activa. Variaciones en el salto térmico para alternativas combinando conductividad y la absortividad de las chapas. [234]**

De forma similar al caso anterior, la combinación de absortividad con conductividad destaca que, si bien la capacidad de transferencia de calor aumenta de forma lineal a medida que aumentan ambos factores (Figura 75), el efecto que se consigue es significativamente más destacable cuanto mayor es la conductividad.

Para el caso del estudio de la absortividad, cabe mencionar la influencia de este parámetro con la emisividad. Tal y como se ha comentado en el apartado 5.2.1.1. del segundo capítulo, de acuerdo con la aproximación de acabados selectivos, resulta interesante buscar recubrimientos que cuenten con una absortividad elevada (para captar la mayor cantidad de energía) y una emisividad reducida para evitar que el calor se pierda hacia el ambiente exterior.

A este respecto, el planteamiento del modelo desarrollado en el que se establece un equilibrio térmico implica que absortividad y emisividad sean iguales, por lo que la influencia de este factor no se ha podido determinar con el presente modelo. Tras analizar las necesidades de un modelo más complejo que tuviera en cuenta estos efectos dinámicos para representar el impacto de la emisividad en diferentes longitudes de onda, se descartó dicha aproximación debido a que el sobreesfuerzo para desarrollarlo para analizar únicamente la emisividad implicaba un proceso significativamente más laborioso.

En la bibliografía se encuentran algunas referencias en las que se cuantifica el efecto de variación de la emisividad como el estudio de Kalogirou [251] que cuantifica el incremento del rendimiento en torno a un 20 % cuando se reduce la emisividad de 0,9 a 0,1. Valores similares son los que presentan O'Hegarty [240] para un colector no vidriado en hormigón y Bonhôte [252] para otra variante de acero.

#### 4.1.1.3. Material aislante

La función principal del aislamiento es prevenir la fuga del calor hacia el interior del panel. Por tanto, el efecto que se busca con el aislamiento es que la energía recolectada se concentre en el área de contacto entre la tubería y el absorbedor. En el estudio realizado se han valorado diferentes materiales alternativos que se considera que tienen propiedades aislantes y se comportan como tales (conductividad < 0,5 W/mK). Por otro lado, se ha estudiado la variación en el espesor del aislante, así como una alternativa extrema sin ningún aislamiento para considerar las consecuencias de un sistema simplificado que no cuente con ningún material aislante. La Figura 76 muestra que, aunque tanto la reducción de la conductividad (izquierda) como el aumento del espesor (derecha) contribuyen a ampliar el rendimiento, la mejora porcentual obtenida es significativamente menor que en el caso del apartado anterior en el que se han estudiado las chapas. Pero sí resulta significativo contar con una cierta cantidad de material aislante, al menos 10 mm, pero que el incremento del aislamiento apenas se aprecia a partir de los 30 mm de espesor.

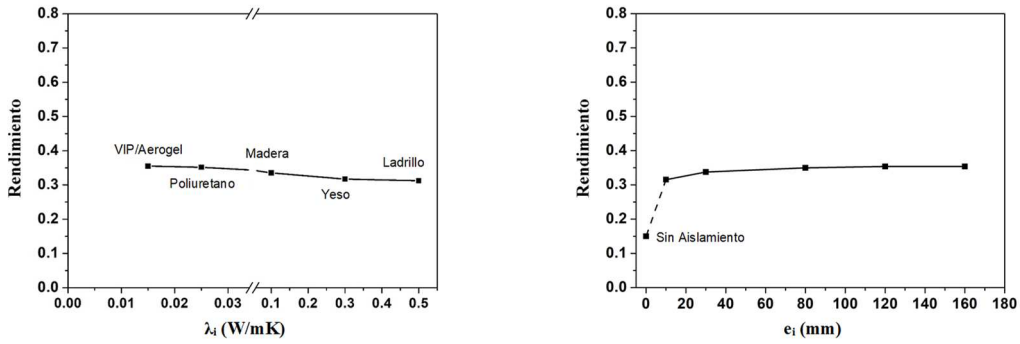



**Figura 76. Estudio paramétrico de la Fachada Activa. Variaciones en el rendimiento para alternativas en la conductividad del aislamiento (izquierda) y el espesor de aislamiento (derecha). [233]**

El análisis de los dos factores combinados y su impacto en el salto térmico (Figura 77) muestra que, para todas las conductividades, la capacidad de transferencia de calor va en aumento hasta alcanzar 80 mm, valor a partir del cual el efecto se atenúa significativamente.

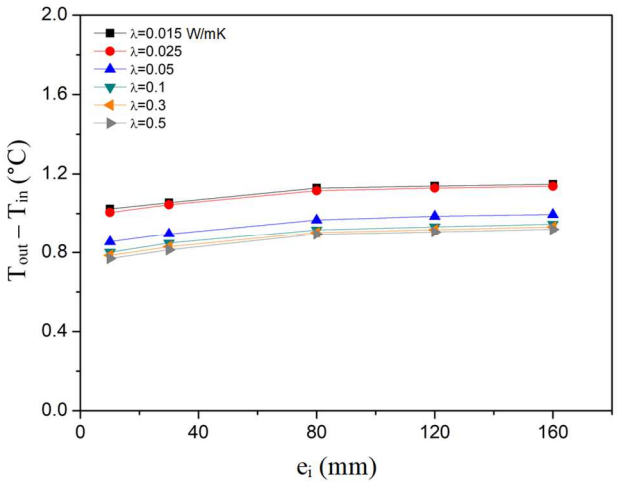


**Figura 77. Estudio paramétrico de la Fachada Activa. Variaciones en el salto térmico para alternativas combinando conductividad y espesor del aislamiento. [234]**

Para el estudio del aislamiento presentado, la condición adiabática establecida para la chapa interior (Chapa 3 en la Figura 60) se ha eliminado de las condiciones de contorno, para valorar el un fenómeno de transferencia de calor hasta dicha chapa y el calor que por convección se emitirá a la cámara de aire cuyo factor convectivo se ha establecido en 5 $W/m^2K$. Este fenómeno únicamente será relevante para aquellos casos en los que la cantidad del aislamiento esté en los rangos inferiores.

#### 4.1.1.4. Cámara de aire en solución sin aislamiento

Como una extensión en el análisis del caso del caso sin material aislante, se estudiaron escenarios alternativos, para poder establecer la influencia de esta situación en la cámara de aire que se genera en la parte posterior del panel. Este análisis tiene sentido cuando el aislamiento es escaso o nulo, puesto que es cuando la cámara de aire trasera tiene incidencia en las chapas del absorbedor. Cuando hay suficiente aislamiento, las chapas exteriores y la cámara de aire quedan térmicamente desconectadas por lo que no hay una relación entre ambas zonas.

Con el fin de modelar diferentes condiciones en la cámara (cerrada o ventilada), se tomaron diferentes valores de convección. Para representar la condición cerrada se escogió 5 $W/m^2$ K y para la ventilada se tomó un valor igual al factor de convección externa ($h = h_W$ según ecuación (23)). A pesar de que el espesor de la cámara podría tener cierta incidencia en el comportamiento del fenómeno de convección, no se va a considerar el espesor de cámara como parámetro de estudio ya que se considera que el factor convectivo representa de forma indirecta dicho parámetro.

Como era de esperar, el resultado fue un menor salto térmico en las cámaras de aire ventiladas debido al efecto de la refrigeración. En promedio, la diferencia para una cámara cerrada sin aislamiento se redujo de 1,12 °C a 0,95 °C, mientras que para la cámara ventilada dicho valor se reduce hasta 0,77 °C, lo que implica que el rendimiento se reduzca respectivamente en 7 y 14 puntos porcentuales frente al caso de referencia.

### 4.1.2. Alternativas para el circuito hidráulico

#### 4.1.2.1. Sistema de conductos

El estudio de la conductividad de los tubos es equivalente al de la conductividad de las chapas exteriores, puesto que ambos elementos contribuyen a la transmisión de calor por conducción. Por tanto, los materiales a considerar también serán similares. Como consecuencia, el impacto resultante de variar la conductividad en el rendimiento diario implica una progresión similar al caso de las chapas (Figura 78 - izquierda) tanto para metales altamente conductores como para plásticos con conductividades más bajas. Si en vez de metal se opta por emplear conductos

plásticos, se produce una diferencia significativa en el rendimiento diario con una reducción de 15 puntos porcentuales. No obstante, si se escoge un metal no se aprecian grandes diferencias en cuanto al material específico empleado (las diferencias suponen apenas variaciones de 0,1 % en el rendimiento). Es decir, si se adopta un sistema con tubos metálicos el rendimiento frente a emplear plásticos es considerable, pero en cuanto al metal seleccionado, el coste será el factor determinante para la elección del material puesto que en el rendimiento no se van a apreciar diferencias importantes entre las alternativas consideradas.

Por otro lado, el espaciado entre conductos determinará el número de tuberías paralelas por metro cuadrado en el colector. Una mayor densidad implica una mayor superficie de intercambio, pero también un aumento en los costes y la complejidad del sistema por la necesidad de tener que integrar y conexionar un mayor número de tubos. La Figura 78 – derecha muestra cómo se reduce ligeramente el rendimiento con la separación entre tubos, en entorno a un 1 punto porcentual, por cada 40 mm de incremento en la distancia entre tubos.

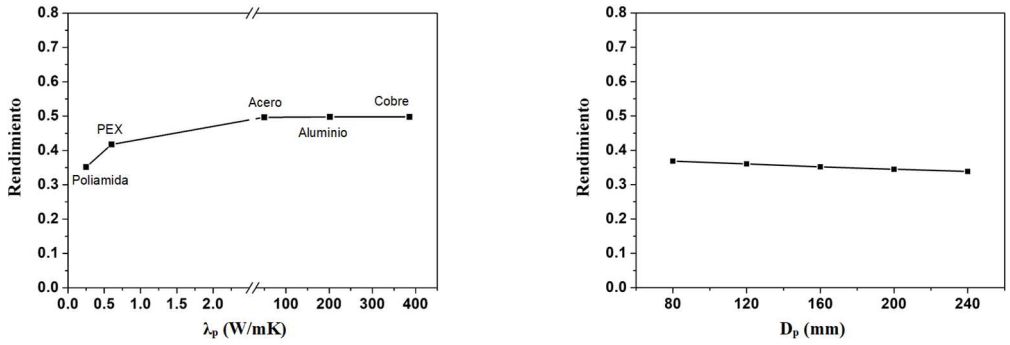



**Figura 78. Estudio paramétrico de la Fachada Activa. Variaciones en el rendimiento para alternativas en la conductividad del tubo (izquierda) y el espaciado entre tubos (derecha). [233]**

El diámetro interior y el espesor de pared del tubo son parámetros definidos por el tipo de material y los productos habituales en soluciones de tuberías que generalmente están disponibles para este tipo de aplicaciones.

Como primera aproximación se considera el diámetro interior como el principal parámetro, dejando el espesor de pared fijo en 1 mm. De esta forma, el caso de referencia cuenta con un diámetro interior de 8 mm y exterior de 10 mm. El aumento del rendimiento se encuentra asociado al aumento del diámetro interior (Figura 79 – izquierda) para un nivel máximo cuando el diámetro es de 12 mm, si bien los casos con 8 mm, 10 mm y 16 mm tienen una respuesta bastante similar a la del caso óptimo. Una vez alcanzado el máximo en 12 mm, el rendimiento disminuye ligeramente con una leve pendiente para diámetros superiores.

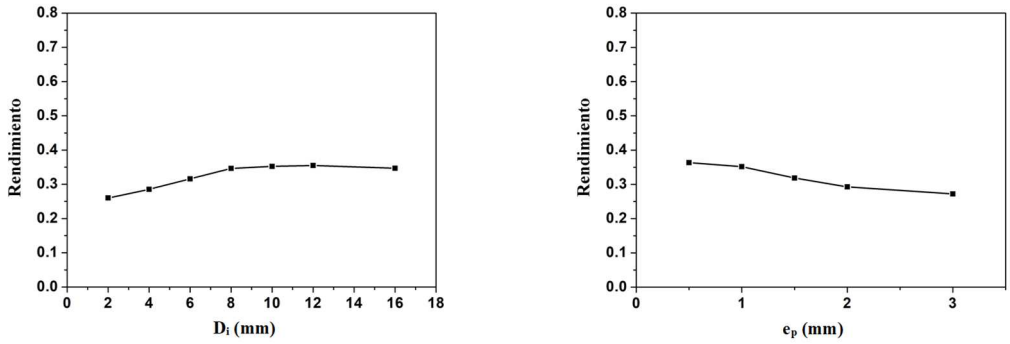



**Figura 79. Estudio paramétrico de la Fachada Activa. Variaciones en el rendimiento para alternativas en el diámetro interior del tubo (izquierda) y el espesor de pared de tubo (derecha). [233], [234]**

Para el caso del espesor de la pared de tubo (Figura 79 – derecha), se aprecia que, frente al caso de referencia, el rendimiento decrece conforme se incrementa el espesor. De forma específica, duplicar el espesor de tubo de 1 a 2 mm, implica una reducción del rendimiento de 5,9 puntos y de 8 puntos si se triplica hasta una pared de 3 mm. La ventaja de reducir el espesor de pared de tubo no guarda la misma proporcionalidad puesto que, si se reduce a la mitad (0,5 mm), el rendimiento se incrementa únicamente 1,2 puntos, siendo éste de 36,4 %.

Este análisis del espesor, no obstante, está estrechamente ligado a la conductividad y al material seleccionado, puesto que al igual que con las chapas, la conductividad y el espesor (cantidad de material conductivo) son dos factores relacionados a la hora de favorecer la conducción de calor. Por tanto, se presenta a continuación el análisis combinando espesor de pared de tubo con conductividad para analizar los diferentes materiales (Figura 80). De esta forma, se puede apreciar que la transferencia de calor es casi imperceptible para diferentes espesores de tubo con altas conductividades (metales), pero que para conductividades bajas como 0,25 W/mK (plásticos) sí se da cierta reducción cuando aumenta el espesor del tubo tal y como se ha descrito anteriormente (Figura 79 – derecha) para el caso del tubo de Nylon ($\lambda_p$ = 0,25 W/mK).

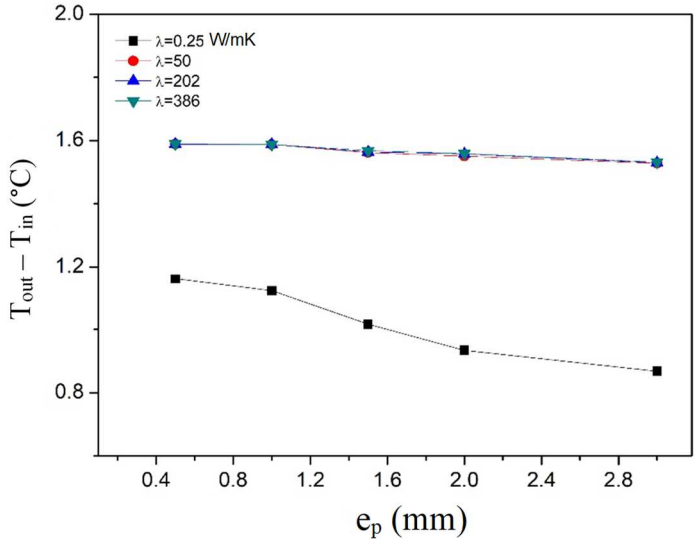


**Figura 80. Estudio paramétrico de la Fachada Activa. Variaciones en el salto térmico para alternativas combinando conductividad y espesor del tubo. [234]**

El último factor por analizar en lo referente al circuito hidráulico es el contacto directo con el absorbedor (Chapa 1 en la Figura 60). A este respecto, se analiza el factor definido como "profundidad del tubo" ($D_e$) que describe la separación que se da entre la chapa del absorbedor (Chapa 1 en la Figura 60) y el perímetro del tubo, tomando como punto de partida un contacto directo ($D_e$ = 0 mm) hasta una separación máxima de 15 mm. En todos los casos, la segunda chapa exterior (Chapa 2 en la Figura 60) está en contacto directo con el tubo, puesto que lo rodea en la mitad inferior del perímetro.

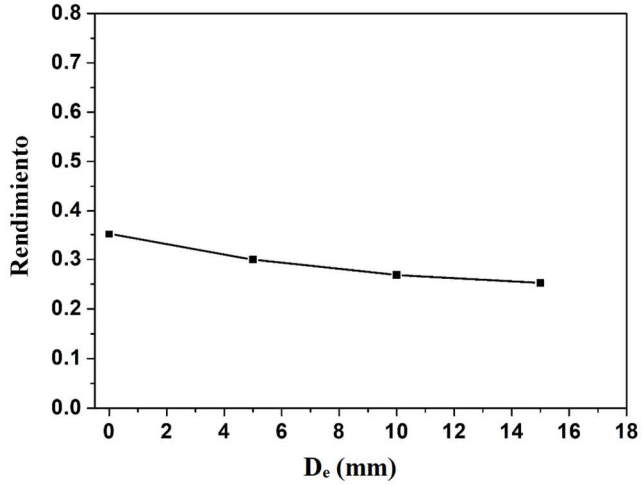



**Figura 81. Estudio paramétrico de la Fachada Activa. Variaciones en el rendimiento para alternativas en la profundidad del tubo y el contacto de este con el absorbedor. [234]**

La Figura 81 muestra la reducción en el rendimiento a medida que aumenta la profundidad del tubo y se elimina el contacto directo entre absorbedor y tubo, siguiendo una progresión similar a la que para el caso de un colector de hormigón no vidriado calculó O'Hegarty [240]. Tal y como se aprecia en la progresión, cuando se pierde el contacto entre tubo y absorbedor se da la mayor reducción en el rendimiento, quedando éste en 29,9 % para una separación de 5 mm. A continuación, la intensidad en la reducción del rendimiento se va atenuando a medida que la profundidad de tubo aumenta, siendo los rendimientos de 26,8 % y 25,2 % para los valores de $D_e$ respectivos de 10 mm y 15 mm.

#### 4.1.2.2. Longitud del panel

El análisis del efecto de la longitud del panel está asociado al del caudal debido a la relación de flujo equivalente establecido, tal y como se ha descrito en la sección 2.1.3 (Figura 65). La longitud es un parámetro con una especial relevancia cuando se definen las fachadas activas en el eje

vertical del edificio en donde se encuentran valores múltiplos de 3 m. Normalmente se consideran este valor como representativo para cubrir al menos una planta. Esto supone una restricción clave para este tipo de aplicaciones de fachada, donde los valores de menos de 3 metros generalmente implican mayores dificultades en la integración.

Por otro lado, la consideración que se ha propuesto para representar las conexiones en paralelo o en serpentín a través de una longitud equivalente, también tiene una asociación con la longitud del estudio. En este caso, se toma en consideración el caso del sistema conectado en paralelo y 3 metros de longitud de panel como referencia. Si se tomara la equivalencia para resolver el mismo sistema en serpentín, puesto que se dispone de 6 tubos en cada panel de 3 metros, la equivalencia serían unos 18 metros de panel.

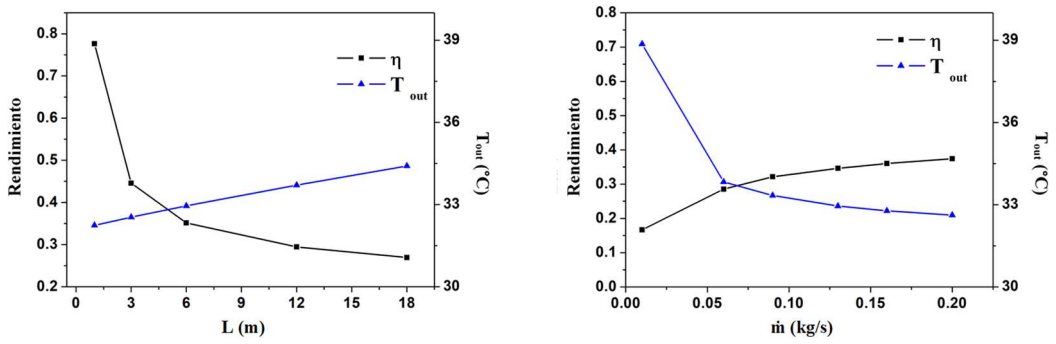



**Figura 82. Estudio paramétrico de la Fachada Activa. Variaciones en el rendimiento y la temperatura de salida del fluido para alternativas en la longitud de panel (izquierda) y el caudal equivalente (derecha). [233]**

En la Figura 82 superior (lado izquierdo) se aprecia que a medida que aumenta la longitud, el rendimiento del sistema disminuye a la vez que la temperatura del fluido a la salida aumenta. El motivo de estos fenómenos es que cuanto mayor sea el panel, mayor será el fenómeno de transferencia de calor desde el absorbedor hasta el fluido lo que implicará un aumento de la temperatura de este. Por otro lado, este aumento de la temperatura y tiempo que necesita el fluido para circular por el panel implicará mayores pérdidas energéticas lo que a la postre, supone una merma en el rendimiento.

Aunque es un parámetro que se va a analizar de forma específica en el siguiente apartado al valorar los factores dinámicos configurables (apartado 4.2.1.1), se incluye también la Figura 82 derecha con el fin de ilustrar el efecto del caudal. Tal y como se puede apreciar el incremento del caudal es contrario al del aumento de la longitud del panel, fenómeno que ha quedado establecido al definir la relación entre ambos parámetros a través de la ecuación (34).

#### 4.1.2.3. Mezcla del fluido calor portador

El efecto de variar las propiedades de la mezcla influye directamente en la cantidad de energía que se obtiene del colector solar sistema (ecuación (7)) puesto que la composición de la misma tiene influencia directa en el calor específico y el caudal másico. En este caso, con el fin de analizar la influencia de la composición de la mezcla en la respuesta del sistema se valoran

diferentes composiciones de alcoholes mezclados con agua, de acuerdo con las referencias para diferentes mezclas expresadas en la Tabla 7 del capítulo II.

Se toma como referencia principal una solución de agua 100% y se analizan tres mezclas diferentes. La mezcla 1 se compone de agua y etanol al 30%, la mezcla 2 de agua y glicol de propileno al 25% y la mezcla 3 se compone de las mismas substancias, pero con una concentración de glicol de propileno del 33%. Las diferentes mezclas implican densidades y calores específicos diferentes frente al caso de referencia.

En la Figura 83 se aprecia como a medida que se van sustituyendo el agua por las mezclas propuestas el rendimiento va incrementándose. El mayor efecto es el que se consigue con la mezcla 3, con un incremento de 3,5 puntos porcentuales resultando en un rendimiento medio diario de 38,6 %. Con la mezcla 2, se obtiene un 36,9 % y con la mezcla 1 un 36,4 %, representando respectivamente incrementos de 1,8 y 1,2 puntos porcentuales.

Cabe destacar que, en todos los casos, la sustitución de agua por las diferentes mezclas propuestas implica un incremento de las viscosidades de los fluidos, factor que tiene un impacto directo en la energía requerida para bombear estos fluidos por el circuito hidráulico. En términos generales, esta energía consumida está en un orden de magnitud similar o, incluso superior, al incremento de energía aprovechable que se obtiene al sustituir la mezcla. Por ello y, desde un punto de vista del balance energético del sistema, la sustitución de la mezcla no proporciona diferencias muy significativas para el sistema analizado. No obstante, existen otra serie de aspectos prácticos, como la posible congelación del sistema en invierno, que exigen analizar la conveniencia de emplear alguna de las mezclas propuesta que, en todos los casos, proporcionan puntos de congelación por debajo de -10 °C.

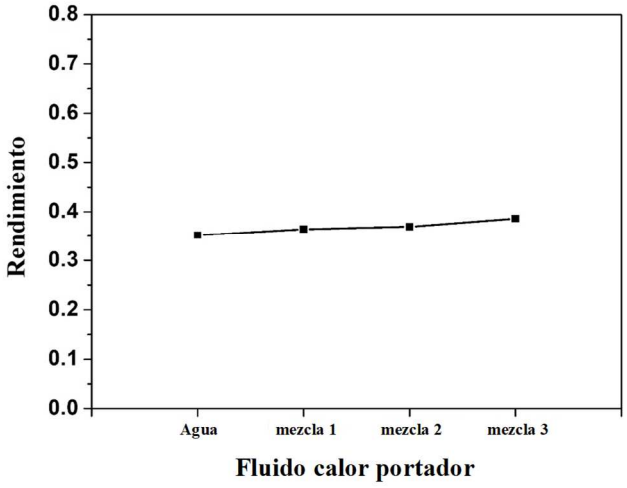



**Figura 83. Estudio paramétrico de la Fachada Activa. Variaciones en el rendimiento para diferentes tipos de mezcla como fluido calor portador**

## 4.2. Efecto de los parámetros dinámicos

Para el estudio de los parámetros dinámicos la referencia no se establece para un día determinado como con el caso de los parámetros de diseño. En este caso, la referencia la

establecen las condiciones que se han definido en la Tabla 25 para unas condiciones ambientales fijadas, así como para unos valores de configuración determinados. En este caso el rendimiento de referencia asociado a dichos valores, con unos valores ambientales de referencia fijos, quedará establecido en 0,43, representando un salto térmico de 2,8 °C. Estos valores son los que se obtiene al modelar el sistema de paneles de base (descrito en la Tabla 24) con las condiciones ambientales definidas para el cálculo de los parámetros dinámicos (Tabla 25).

### 4.2.1. Parámetros dinámicos de configuración

El estudio de los parámetros de configuración está directamente vinculado a la regulación y forma de operar el conjunto. Así las variaciones de caudal y de temperatura de impulsión determinarán la respuesta de la fachada activa tanto en cuanto al rendimiento como al salto térmico que se obtiene.

#### 4.2.1.1. Caudal y temperatura de impulsión

Para el caso del caudal, tal y como se ha tratado en un apartado anterior al comentar el efecto de la longitud (apartado 4.1.2.2), un aumento del caudal de 0,04 kg/s hasta 0,2 kg/s representa un aumento de η de 0,34 a 0,46, mientras que ($T_{out}$-$T_{in}$) disminuye de 7,45 °C a 1,99 °C (Figura 84 – izquierda).

Esta progresión es acorde con los resultados desarrollados en estudios similares realizados por otros autores [240], [253], [254]. La principal consecuencia de este fenómeno es que, para un nivel elevado de caudal, la transferencia de calor es menor debido a que el calentamiento en el fluido es menos acusado puesto que el efecto de conducción resulta ser más limitado. Pero, sin embargo, a pesar de esta reducción del salto térmico, el aumento de caudal implica que el rendimiento se vea incrementado en términos absolutos.

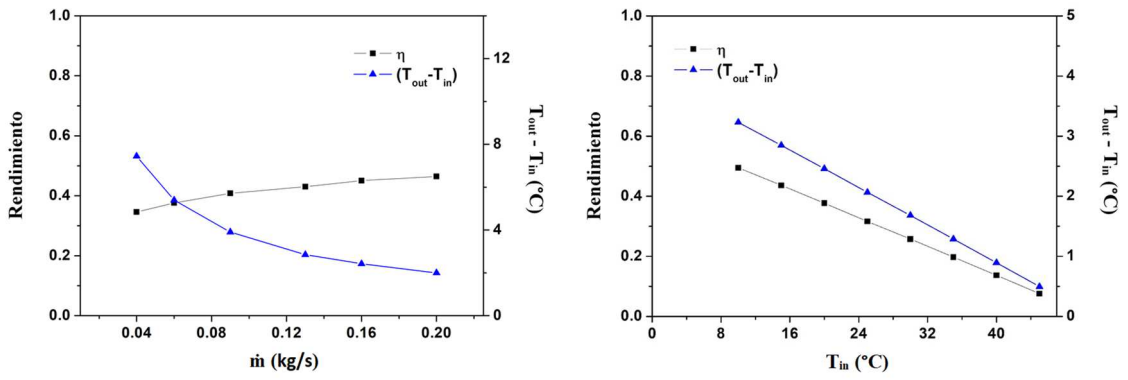



**Figura 84. Estudio paramétrico de la Fachada Activa. Variaciones en el rendimiento y el salto térmico del fluido en el colector para alternativas en el caudal (izquierda) y la temperatura de impulsión (derecha). [235]**

Por otro lado, para el caso de la temperatura de impulsión del fluido, un aumento de 35 °C implica una reducción tanto del salto térmico (2,74 °C menos de diferencia) como del rendimiento (reducción de 42 puntos, de 49 % a 7 %). Tal y como se aprecia en la (Figura 84 – derecha), se da una tendencia lineal relacionando la temperatura con el salto térmico y el rendimiento. En ambos casos con el incremento de $T_{in}$ los factores tienden a cero puesto que una vez se alcancen temperaturas equiparables en la impulsión y el retorno, la producción energética del sistema será nula al igual que el rendimiento. La progresión de ambas curvas es similar al de estudios comparables [253], [255].

### 4.2.2. Parámetros dinámicos ambientales

Para el caso de los parámetros ambientales se considera el efecto de la variación de la temperatura ambiente, radiación y velocidad del viento.

#### 4.2.2.1. Temperatura ambiente y radiación solar

La Figura 85 muestra a la izquierda la variación del rendimiento y de la diferencia ($T_{out}$-$T_{in}$) asociada a la temperatura ambiente. Un aumento de 5 °C a 40 °C en la temperatura exterior lleva aparejado una subida de parámetros: de 0,34 a 0,72 para el rendimiento y de 2,22 °C a 4,73 °C para el salto térmico, con una relación lineal para ambos parámetros [253].

A pesar de que podría considerarse a priori que la radiación es el factor más influyente en el comportamiento del colector debido a la energía que incide en la superficie del mismo, el efecto sí que tiene un impacto significativo en el salto térmico, pero sin que apenas se aprecie un cambio en el rendimiento. En la misma Figura 85, al lado derecho, se muestra el efecto de la radiación en estos dos parámetros en donde a pesar de que la radiación pase de 100 a 1000 W/m$^2$, el rendimiento únicamente varía entre 0,4 y 0,43. En cambio la diferencia de temperatura entre la entrada y la salida tiene una progresión lineal pasando de 0,44 °C a 4,71 °C. Es decir, la producción neta del panel aumenta y se da una mayor cantidad de energía recogida en el colector, pero el rendimiento apenas varía.

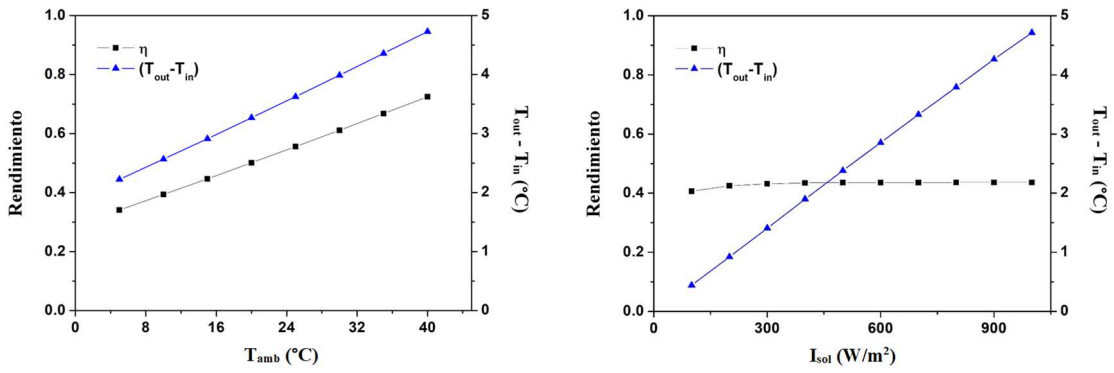


**Figura 85. Estudio paramétrico de la Fachada Activa. Variaciones en el rendimiento y el salto térmico del fluido en el colector para alternativas en la temperatura ambiente (izquierda) y la radiación solar en el plano de la fachada (derecha). [235]**

#### 4.2.2.2. Velocidad del viento

Finalmente, para considerar el efecto del viento que afecta principalmente a las pérdidas por convección [241], el estudio paramétrico contempla una velocidad que va incrementándose de 1 m/s a 6 m/s. Por tanto, a mayor efecto del viento, mayores pérdidas y menores saltos térmicos y rendimiento, tal y como se aprecia en la siguiente Figura 86, en donde las bajadas son de 0,46 a 0,27 y de 3,064 °C a 1,802 °C respectivamente.

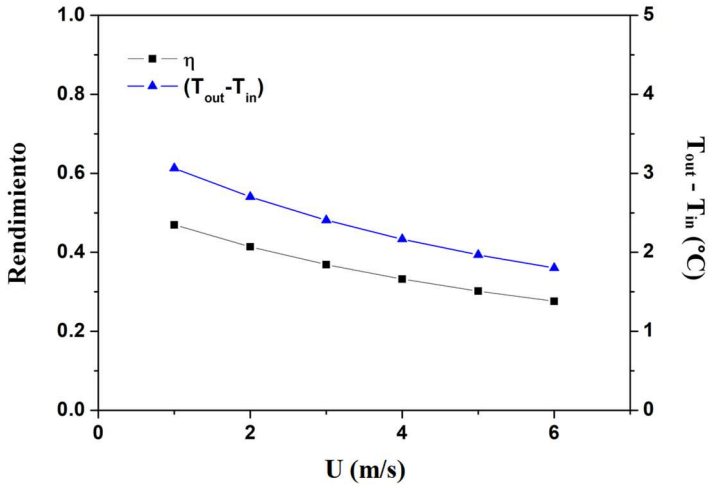



**Figura 86. Estudio paramétrico de la Fachada Activa. Variaciones en el rendimiento y el salto térmico del fluido en el colector para alternativas en la velocidad del viento. [235]**

# 5. CURVAS DE CARACTERIZACION DEL PANEL

## 5.1. Curvas características

Para completar el estudio y obtener una completa caracterización del sistema construido en su primera concepción como prototipo, se llevó a cabo un análisis de la producción de energía recogida por el prototipo de panel entre los meses de marzo y agosto de 2017 dentro de la campaña correspondiente al año 2017 (Tabla 22). Se trata de una serie de meses en los que se experimentó con la misma superficie activa de fachada (6 $m^2$), funcionando en diferentes condiciones ambientales y los que se obtuvieron datos suficientes con los que establecer un patrón de comportamiento de la fachada activa. Más adelante, se analizaron otros modos de funcionamiento variando superficie activa y caudal, modos de funcionamiento, que, en cualquier caso, se van a describir y a analizar en el siguiente capítulo IV.

Por tanto, este análisis que se presenta en este capítulo III, permite valorar y calcular el potencial del diseño de fachada activa desarrollado, con el fin de poder contrastar el diseño frente a soluciones equiparables. Por otro lado, este análisis permite establecer una primera cuantificación de la producción energética asociada al sistema, factor sobre el que se va a profundizar en el siguiente capítulo de la tesis, analizando las producciones registradas en diferentes condiciones de funcionamiento.

El rendimiento diario para niveles de radiación solar significativos osciló entre el 4 % y el 36 %, con una producción diaria promedio de 0,326 kWh / $m^2$ recogidos durante ese período de 6 meses. Tal y como se verá más adelante en el capítulo IV, al analizar una campaña más extensa, la magnitud de estos valores de rendimiento y producción quedará matizada según el tipo de aplicación.

Como parte de este proceso de investigación experimental y monitorización del sistema, se calcularon mediante regresión lineal las curvas características del sistema. Para ello se emplearon los datos recopilados durante un mes completo de la campaña experimental. Combinando la producción con la radiación incidente, se calcularon los datos de rendimiento (ecuación (6)), obteniendo los factores de rendimiento del sistema instalado para cuatro velocidades de viento diferentes. Estas cuatro curvas son las que se describen tanto en la Tabla 28 como en la Figura 87, donde se puede apreciar el efecto fuerte impacto del viento en la respuesta del sistema.

| Velocidad del viento | Pendiente ($F_R U_L$) | Intersección ($F_R \alpha$) | $R^2$ |
|---|---|---|---|
| 0 < U < 1 | - 4,851 | 0,47 | 0,96 |
| 1< U < 2 | -6,886 | 0,44 | 0,96 |
| 2 < U < 3 | -7,391 | 0,39 | 0,97 |
| 3 < U < 4 | -7,501 | 0,34 | 0,96 |

**Tabla 28. Parámetros de rendimiento del sistema de Fachada Activa monitorizado para 4 velocidades de viento calculados mediante regresión. [233]**

Si se comparan los resultados obtenidos con los diferentes sistemas existentes en el mercado tal y como se ha representado en Tabla 12 del segundo capítulo de la tesis, en la que se mostraban sistemas de similares características, el sistema instalado y analizado en el presente estudio tiene en general una eficiencia menor a los valores declarados para esas otras soluciones.

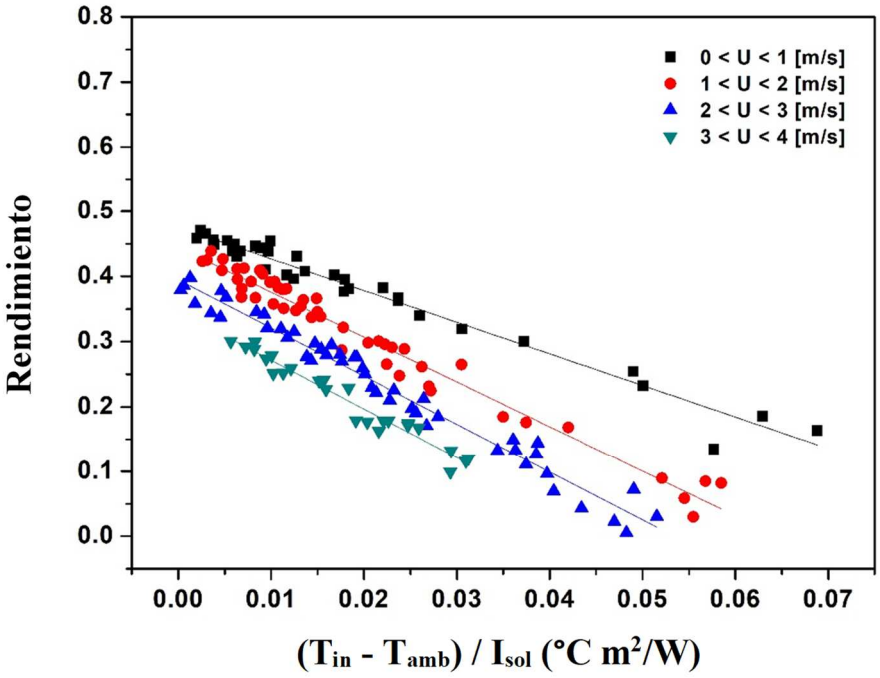



**Figura 87. Curvas de rendimiento del prototipo para diferentes velocidades de viento. [233]**

Uno de los motivos por los que se considera que se dan estas diferencias es influencia de la superficie activa total analizada, que es significativamente mayor (hasta 6 veces) que la de esas otras soluciones, lo que implica un efecto que reducción sustancial en el rendimiento final estimado [256]. El segundo aspecto que influye en el menor rendimiento presentado es el método empleado para caracterizar el colector, basado en datos experimentales en condiciones reales de uso y no en los ensayos normalizados planteados por las normas UNE EN ISO 9806:2014 [258] y UNE EN 12975-2:2006 [257]. La caracterización basada en datos experimentales con condiciones ambientales variables y no controladas, da como resultado rendimiento menores en el caso de los colectores solares térmicos, de acuerdo con algunos estudios en los que se comparan ambas aproximaciones [259], [260].

En cualquier caso, además de las curvas de caracterización para poder predecir y simular el sistema, resulta de interés conocer la producción asociada al sistema, producción que ha sido estudiada y que se va a presentar más adelante en el capítulo IV de la tesis.

# 6. ANALISIS DE RESULTADOS DEL ESTUDIO PARAMETRICO

## 6.1. Parámetros de diseño

Se han ido presentando en los apartados 4.1.1 y 4.1.2 previos el efecto, en las prestaciones del sistema, al variar los diferentes parámetros de diseño para configurar la solución constructiva basada en el panel sándwich en primer lugar y para el circuito hidráulico integrado a continuación.

Se ha considerado la variación de cada parámetro independiente en relación con a un sistema de referencia funcionando con unas condiciones determinadas que daban como resultado un rendimiento que determina la base para la comparación: 35,1 % de rendimiento. Si se comparan las diferentes modificaciones frente a esa referencia, los efectos de adoptar cada medida concreta pueden ser valorados en comparación con el resto (Figura 88). Esta gráfica permite a su vez, destacar el potencial de cada parámetro de forma independiente en el rango analizado, permitiendo así valorar los límites que puede llegar a alcanzar cada uno para incrementar o disminuir el rendimiento del conjunto. Por otro lado, la referencia indicada permite identificar los límites del sistema diseñado y, concretamente, aquellos componentes que deberían ser objeto de actuación para hacer viables nuevos incrementos del rendimiento. De forma análoga la Figura 89 presenta el caso del salto térmico al variar los factores de diseño.

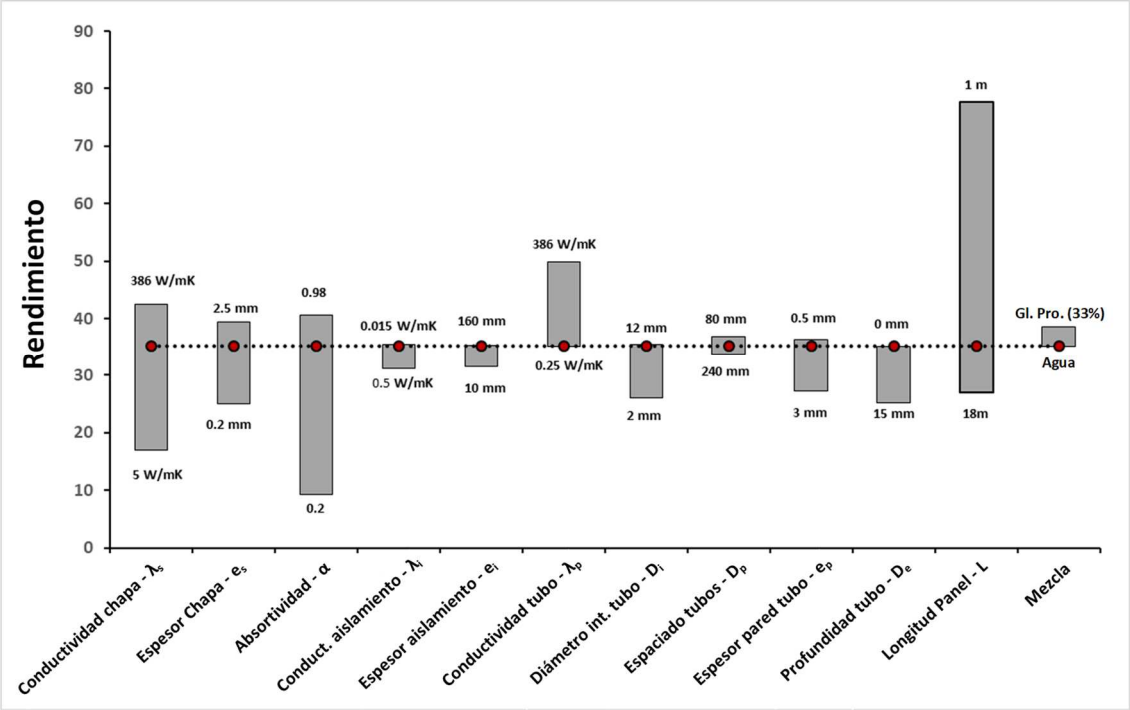



**Figura 88. Resultados del estudio paramétrico para los parámetros de diseño representando el rendimiento máximo y mínimo al variar cada parámetro de forma individual. [233]**

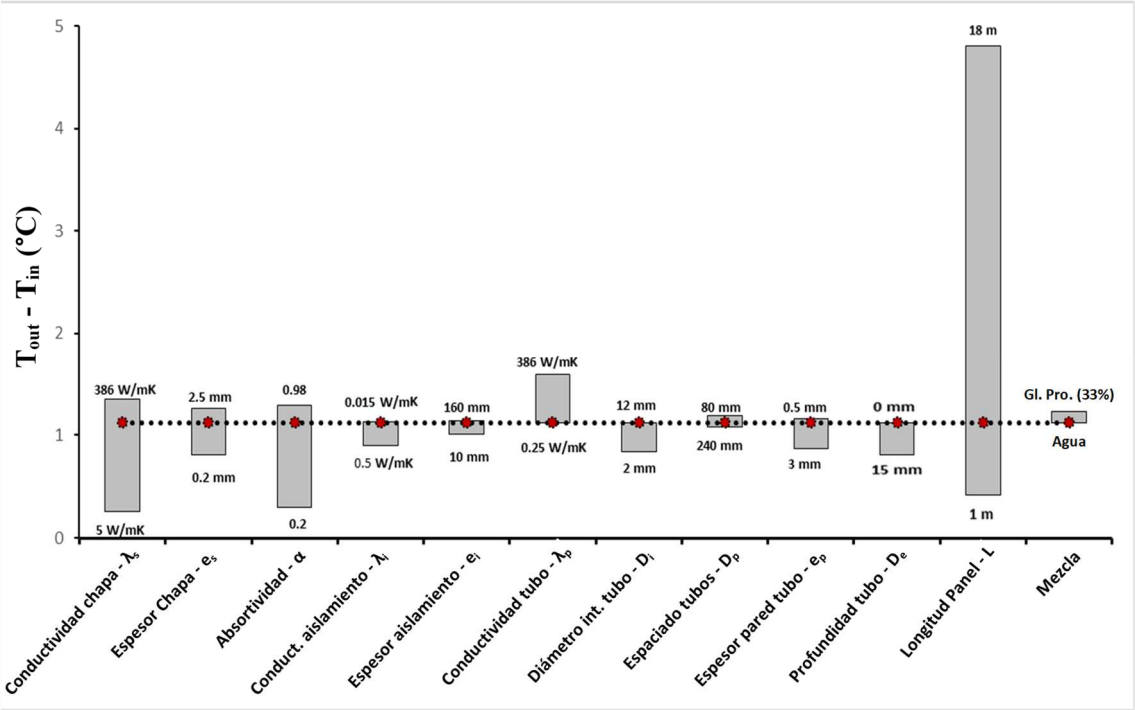



**Figura 89 Resultados del estudio paramétrico para los parámetros de diseño representando el salto térmico máximo y mínimo al variar cada parámetro de forma individual**

De los parámetros constructivos analizados, ***la longitud del panel, la conductividad y la absortividad de la chapa, el espesor de la chapa, así como la conductividad del tubo, han sido identificados en ese orden, como las variables más influyentes para mejorar la transferencia de calor y, por tanto, incrementar el rendimiento***. La variación de estos factores implica diferencias muy significativas en el rendimiento, de hasta varias decenas de puntos porcentuales.

Por otro lado, ***las características geométricas como el diámetro interior del tubo y el espesor de la pared, así como la profundidad a la que se posiciona*** el tubo frente al absorbedor, ***tienen un efecto intermedio***, pudiendo reducir el rendimiento en hasta 10 puntos, si bien, los valores adoptados como referencia suponen un buen diseño para estos parámetros.

Finalmente, ha quedado de manifiesto también que las variaciones en ***el espaciado entre conductos, así como el espesor y conductividad del aislamiento del panel y el tipo de mezcla empleada*** como fluido calor portador, ***apenas tienen influencia en el rendimiento***, por lo que se concluye que, en términos generales, estos parámetros no son críticos para el diseño del sistema.

Para el caso concreto del aislamiento del panel, aunque sea un factor con menor influencia, sí que cabe destacar que su presencia supone un aspecto diferenciador. Para evitar pérdidas de calor importantes, se ha demostrado la necesidad de contar con al menos una cierta cantidad mínima de aislamiento, así como con una cámara de aire no ventilada.

Para valorar el diseño, se ha tomado en consideración tanto el sistema experimental de fachada activa que se construyó y materializó en la instalación implantada en el edificio experimental estudiado, como el modelo desarrollado que se ha tomado como referencia basado en dicho sistema (Tabla 24). Al valorar los resultados del estudio paramétrico se puede concluir que, en

términos generales, el diseño contó con una adecuada selección de parámetros, estando la mayor parte de estos dentro del rango superior de rendimiento, excepto para la longitud del panel y la conductividad de los tubos. Sin embargo, para algunos de los otros parámetros existe todavía un amplio margen de mejora, así como diferentes combinaciones que podrían considerarse para obtener rendimientos con un mayor impacto.

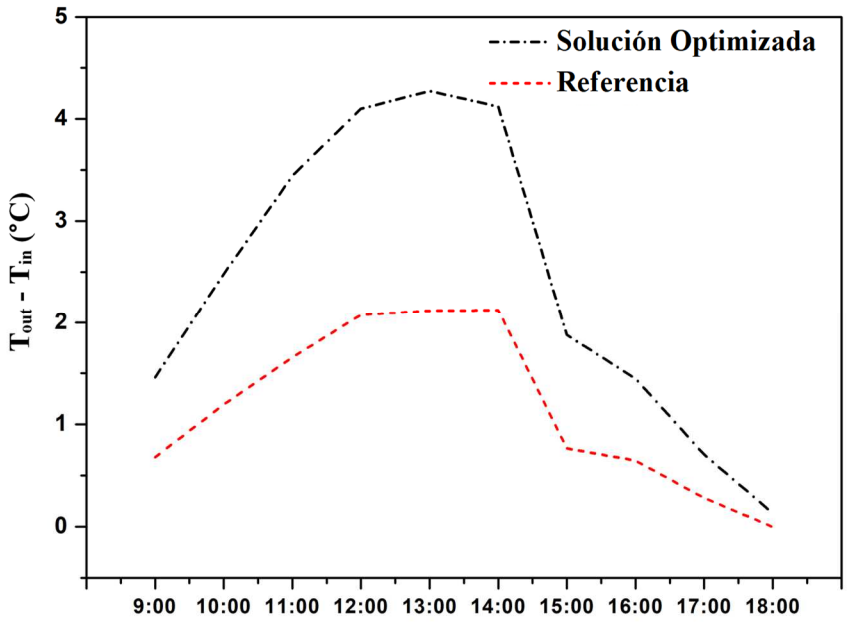



**Figura 90. Valores simulados representando el salto térmico ($T_{out}$ – $T_{in}$) comparando la curva de progresión para el sistema de referencia con la de un caso optimizado para el caso de estudio. [233]**

Si se modificaran a la vez los tres parámetros más influyentes para lograr una solución con mayor rendimiento, reduciendo la longitud del panel a 3 m, cambiando la conductividad de la tubería a través de un material más conductivo (cobre) y, aumentando la capacidad de absorción del absorbedor a 0,98, se podría llegar a obtener, a priori, un rendimiento diario de hasta un 66 %, gracias a un efecto combinado de los factores mayor que si se consideraran estas variables de forma independiente. Otra alternativa consistiría en mantener la longitud de 6 m, emplear cobre para resolver tanto el sistema de tubos como el absorbedor, dando como resultado de nuevo un rendimiento diario del 66 %. Para este segundo cálculo, la Figura 90 muestra las diferentes progresiones en el salto térmico ($T_{out}$-$T_{in}$) si se compara el caso de referencia y el optimizado en el transcurso del día que se ha empleado como referencia, considerando en ambos casos una misma temperatura de entrada del fluido al colector ($T_{in}$).

Como resultado general del análisis realizado se puede concluir que el impacto de los parámetros de diseño en la eficiencia del sistema es altamente significativo. Si se seleccionan correctamente, esos parámetros pueden llevar a mayores rendimientos, así como a temperaturas de salida más elevadas que dan como resultado mayores niveles de producción solar, aunque la rentabilidad de modificar el diseño frente a la energía obtenida debe valorarse adecuadamente. Sin embargo, en el otro extremo, apenas se captará energía si los parámetros seleccionados están en el rango inferior y no favorecen la captación y transmisión de la energía.

## 6.2. Parámetros dinámicos

De forma equivalente al caso de los parámetros de diseño, en el apartado 4.2 se han analizado los efectos que se originan cuando se alteran los factores dinámicos de configuración, así como las condiciones ambientales exteriores.

Para este estudio la referencia no se establece frente a un día real como en el caso anterior, sino que se establecen unas condiciones específicas que implican un rendimiento de referencia mayor (43 %). Es decir, en vez de la progresión horaria con un pico cercano a los 450 W/m$^2$ del caso anterior (Figura 68) y con una temperatura ambiente media de 26,7 °C, las condiciones se asumen constantes a lo largo de todo el día y son las establecidas en la Tabla 25, con 600 W/m$^2$ y 14 °C de temperatura ambiente. Podría por tanto, considerarse que el aumento del rendimiento se debe a la mayor radiación, pero tal y como se ha descrito anteriormente, un aumento de la radiación apenas incide en el rendimiento (Figura 85 derecha), a la vez que el descenso de 12,7 °C de la temperatura ambiente debería suponer una merma de en torno a 10 puntos porcentuales. Para encontrar el motivo principal por el que el rendimiento aumenta hay que prestar atención a la temperatura de impulsión, puesto que en vez de los 30,19 °C de media de la referencia en el caso de los parámetros de diseño, la temperatura de impulsión se ha fijado en 15 °C, por lo que esta diferencia en las condiciones de funcionamiento compensa sobradamente esa bajada de rendimiento asociada a la temperatura ambiente y en consecuencia, aumenta el rendimiento hasta alcanzar el citado valor de 43 %.

Este análisis para el caso del rendimiento de referencia es un ejemplo claro en el que se aprecia el efecto de cada parámetro dinámico en la respuesta del sistema. Si se analiza la relación con el rendimiento (Figura 91), la temperatura de impulsión es la que mayor incidencia tiene en el mismo seguida por la temperatura ambiente. Ambos factores implican respectivamente variaciones de 41 y 38 puntos porcentuales en el rendimiento para los rangos analizados.

A continuación, alteraciones en la velocidad del viento y el caudal suponen variaciones de 19 y 11 puntos, mientras que los cambios en la radiación apenas se perciben alternado el rendimiento únicamente en 3 puntos porcentuales.

Por otro lado, el análisis de la influencia en el salto térmico de estos mismos parámetros que se han considerado para el estudio del rendimiento, dentro de los mismos rangos, proporcionan una información complementaria de gran interés para comprender mejor la respuesta de la fachada activa ante alteraciones, tanto de las condiciones ambientales como de operación del sistema. Resulta necesario remarcar la relación directa que existe entre el salto térmico y la energía que es capaz de capturar el colector, puesto que éste es el principal interés de la fachada activa, energía que contribuirá significativamente a incrementar la producción de renovables en las aplicaciones previstas, tal y como se comentará en los siguientes capítulos de la tesis.

A este respecto, la siguiente Figura 92 muestra que los parámetros con mayor influencia en el salto térmico son el caudal y la radiación en ese orden, con variaciones en el salto térmico de 5,44 °C y 4,27 °C respectivamente. Resulta importante destacar que estos dos han sido precisamente los que tenían una menor incidencia en el rendimiento del panel (Figura 91). Otros parámetros que afectan en menor medida al salto térmico son la temperatura de entrada del fluido (Variaciones de 2,77 °C), la temperatura ambiente (2,5 °C) y la velocidad del viento (1,26 °C).

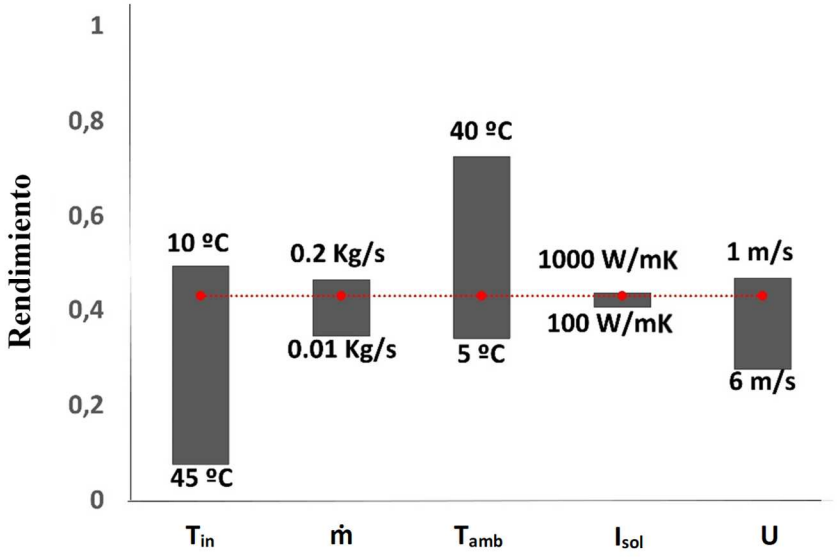



**Figura 91. Resultados del estudio paramétrico para los parámetros dinámicos representando el rendimiento máximo y mínimo al variar cada parámetro de forma individual. [235]**

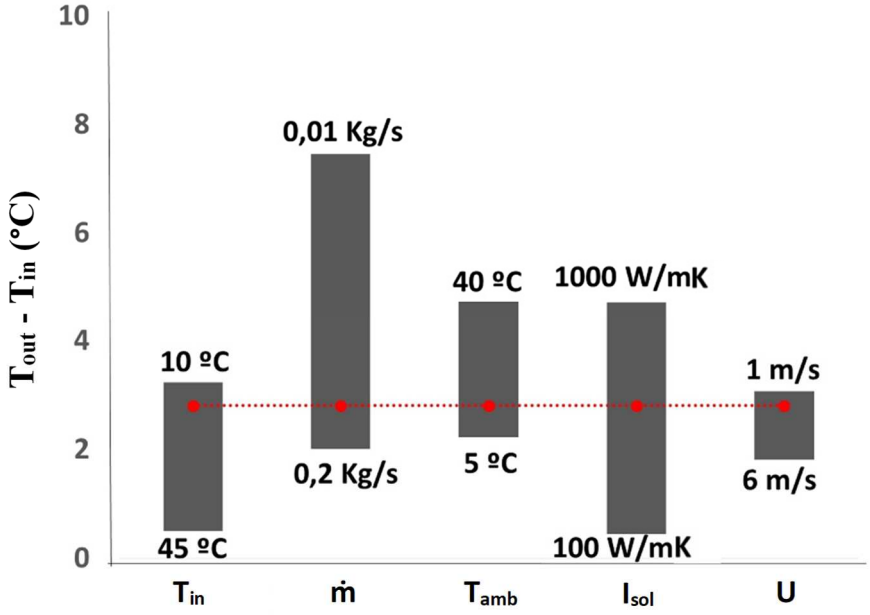



**Figura 92. Resultados del estudio paramétrico para los parámetros dinámicos representando el salto térmico ($T_{out}$-$T_{in}$) máximo y mínimo al variar cada parámetro de forma individual. [235]**

Tras este análisis se puede concluir que hay ciertas variables dinámicas (radiación y caudal) que a pesar de maximizar el salto térmico apenas tienen incidencia en el rendimiento, mientras que aquellas que maximizan el rendimiento (temperatura de impulsión y temperatura ambiente) sí que tienen una relación más directa con el salto térmico. El efecto del viento se considera más modesto y equilibrado en ambos ámbitos del análisis.

Por tanto, se puede concluir que la diferencia en el salto térmico y la energía recogida se maximizarán cuando, la radiación solar y la temperatura ambiente sean altas, a la vez que el

caudal, la temperatura de entrada y la velocidad del viento sean mínimas. Si lo que se quiere maximizar es el rendimiento, se buscará fundamentalmente una temperatura ambiente alta para una velocidad de viento y temperatura de entrada baja. En menor medida, un caudal elevado contribuirá a incrementar el rendimiento mientras que la radiación apenas influye en este caso.

# 7. CONCLUSIONES

En este tercer capítulo de la Tesis se han trabajado dos aspectos principales:

- primero se ha desarrollado un modelo CFD con el que poder simular soluciones alternativas al diseño de fachada activa original, y
- segundo, se ha llevado a cabo un estudio paramétrico, empleando dicho modelo, con el que se pretende modelizar, comprender y cuantificar el impacto que soluciones y parámetros alternativos implican en cuanto a la respuesta del sistema activo.

Se trata, por tanto, de una continuación de las principales conclusiones del capítulo II en el que se recomendaba el empleo de un modelo fluido dinámico como opción que permita una amplia flexibilidad para el análisis. En dicho capítulo se identificaron también los parámetros a estudiar y se establecían los valores entre los que se buscaba desarrollar el estudio.

Para desarrollar el modelo, se han descrito en primer lugar los fenómenos físicos y ecuaciones principales que representan el comportamiento del sistema, para trasladarlos a continuación de forma adecuada a través de la modelización. Tomando una sección representativa de la fachada que actúa como colector solar, se han definido los componentes principales que describen el panel y el circuito hidráulico integrado. Gracias los datos experimentales obtenidos en la instalación piloto con una fachada activa instalada en la infraestructura experimental Kubik® de Tecnalia en Derio, se ha podido validar el modelo. Para ello, se han comparado los valores simulados frente los datos monitorizados, para lo que se han empleado diferentes condiciones y escenarios de funcionamiento en días concretos pertenecientes a la extensa campaña de monitorización desarrollada en 2016, 2017 y 2018. Los datos experimentales considerados en este caso son únicamente un extracto de la investigación experimental completa desarrollada y que se va a describir y analizar en detalle en el siguiente capítulo IV.

Con el modelo completamente desarrollado y validado, se ha podido llevara a cabo el estudio paramétrico con el que se ha podido constatar la relevancia de ciertos parámetros, tanto en el rendimiento como en el salto térmico proporcionado que, a la postre, representa la energía que se puede conseguir a través del sistema de fachada activa. Del mismo modo, se ha demostrado la menor relevancia de otros parámetros dentro del enfoque planteado en este análisis. El estudio se ha orientado a valorar en primer lugar los parámetros de diseño, que son aquellos que quedan explícitos cuando la definición del sistema se materializa en una solución de fachada y, por otro lado, los parámetros dinámicos que o bien pueden ser regulados durante la operación del sistema o bien quedan sujetos a los cambios que se produzcan en las condiciones ambientales.

### *Parámetros de diseño*

En lo referente a los parámetros de diseño, la longitud del panel de fachada, su capacidad de absorción y los materiales empleados se identifican como parámetros clave de diseño, mientras que el número de tuberías por panel y el nivel de aislamiento tienen en general una relevancia menor. En términos generales el empleo de metales con alta capacidad de absorción en el absorbedor resulta de interés para esta aplicación. La menor relevancia del aislamiento queda condicionada a que exista una cantidad mínima del mismo (10 mm de espesor y < 0,04 W / mK) para evitar una fuga importante de calor.

Tomando en consideración que la aplicación prevista es la de disponer el sistema como una fachada en un edificio, la longitud y modulación del panel son aspectos que representarán a su vez limitaciones particulares y deberán seleccionarse cuidadosamente en combinación con todos los demás factores de diseño para una integración completa en la fachada. En la misma línea a pesar de que la cantidad de aislamiento no sea tan importante para la respuesta de la fachada como colector, sí que es necesario valorar el interés para la aplicación de aislamiento térmico de fachadas en donde, necesariamente, se va a requerir de una cantidad considerable de material.

Para los parámetros de diseño vinculados al circuito hidráulico, como con el absorbedor, el uso de metales proporciona un impacto directo con un mayor rendimiento. Se ha identificado un valor óptimo del diámetro interior del tubo de 12 mm, mientras que la densidad de los conductos por $m^2$ y el espesor de pared de tubo (siempre que sea metálico) no resultan muy significativos para los rangos en estudio.

*Parámetros dinámicos*

Por otro lado, para el caso de los parámetros dinámicos, se ha identificado el diferente comportamiento que resulta cuando se analizan las variables para los factores de configuración y los parámetros ambientales.

Así, una combinación efectiva de una regulación adecuada del caudal maximizándolo cuando se dan los momentos de mayor radiación, permitirá maximizar el salto térmico y en consecuencia la producción solar de la fachada activa. No obstante, esta configuración para maximizar la producción apenas influirá en el rendimiento, dándose una baja alteración de este.

Por el contrario, para aquellas variables que maximizan el rendimiento (temperatura de impulsión y temperatura ambiente) sí que obtiene una correlación más directa con el salto térmico y la producción solar. El efecto del viento se considera el más modesto y equilibrado en ambos ámbitos del análisis, de entre los cinco parámetros dinámicos considerados. A pesar de que el escenario óptimo sea la ausencia de este, no se considerará la velocidad del viento entre los primeros parámetros con los que optimizar la respuesta del sistema en términos de factores dinámicos. No obstante, si se compara con los factores de diseño anteriormente descritos, la influencia del viento sí que resulta ser un factor relevante, puesto que se trata de un colector no vidriado para los que los efectos convectivos tienen un impacto importante a valorar.

Finalmente se han estimado experimentalmente las curvas de rendimiento representativas de un panel de $6m^2$ calculadas para diferentes velocidades de viento. El resultado ha sido un rango de rendimiento máximo ($F_R\,\alpha$) de 0,34 – 0,47 y un factor de reducción energética ($F_R\,U_L$) de 4,851 – 7,501. A pesar de ser todavía resultados modestos frente a las otras soluciones identificadas, se ha destacado que la merma en el rendimiento se asocia tanto al tamaño de la superficie activa analizado, como al método experimental empleado con el que los rendimientos obtenidos son menores que en los ensayos bajo norma.

Resulta necesario añadir también que, gracias al estudio paramétrico, se ha demostrado la posibilidad de aumentar los rendimientos obtenidos de forma significativa, para lo que será necesario seleccionar los parámetros de diseño adecuadamente, y operar y adaptar el sistema de acuerdo con las condiciones dinámicas que permitan aprovechar al máximo la solución de fachada activa propuesta.

Como conclusión general del estudio presentado en el que se han combinado resultados calculados y obtenidos experimentalmente, se ha constatado la necesidad de tener un mayor conocimiento y comprensión adecuada de cómo se comportan estos sistemas activos y de la medida del impacto que tienen los diferentes factores. En un siguiente paso, resulta necesario analizar y cuantificar cómo se transforma esta energía solar obtenida por la fachada, así como la interacción de estos componentes activos con otros sistemas de producción térmica (climatización y producción de ACS), valorando los patrones de consumo que permitan comprender mejor el verdadero potencial de estas fachadas activas en aplicaciones reales.

Los resultados que se han presentado en este caso son, en su mayoría, valores estimados del comportamiento del sistema. Gracias al modelo desarrollado se puede estimar la respuesta de la fachada. Se ha hecho una primera introducción de la aplicación real de esta fachada con los prototipos construidos, con los que se han adelantado los primeros resultados de la interacción de la fachada con el resto de los elementos que conforman el sistema solar completo.

Estas interacciones son las que se van a estudiar en el siguiente capítulo IV de la tesis, profundizando así en la relación que se establece entre el sistema solar y el circuito solar en primer término, y con un sistema térmico gobernado por una bomba de calor, después. Estos estudios complementarán el que se ha presentado en este tercer capítulo, ofreciendo así información relevante de los sistemas de fachadas activas en el entorno en el que se pretenden integrar, de forma específica estudiando el rendimiento combinado con una bomba de calor, en donde se consideran que se dan sinergias potenciales entre ambas tecnologías.

# 8. REFERENCIAS


[233] Elguezabal, P., Lopez, A., Blanco, J. M., & Chica, J. A. (2020). CFD model-based analysis and experimental assessment of key design parameters for an integrated unglazed metallic thermal collector façade. Renewable Energy, 146, 1766–1780. https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.07.151

[234] Elguezabal, P., Lopez, A., Blanco, J. M., & Chica, J. A. (2019). New concept of solar collector integrated into a sandwich panel as an active façade; CFD based parametric assessment and case study. DYNA, 94, 691–698. https://doi.org/ http://dx.doi.org/10.6036/9274

[235] Elguezabal, P., Lopez, A., Blanco, J.M., Chica, J.A. (2019). Parametric assessment of a building active façade by means of a combined metallic sandwich panel with an unglazed solar collector. MATEC Web Conf. 282 02046 (2019). DOI: https://doi.org/10.1051/matecconf/201928202046

[236] Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). Solar Engineering of Thermal Processes (4th Edition). Wiley.

[237] Elguezabal, P., Garay, R., & Martin, K. (2017). Experimentation under real performing conditions of a highly integrable unglazed solar collector into a building façade. In Energy Procedia (Vol. 122). https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.395

[238] Chica, J.A., Apraiz, I., Elguezabal, P., Rips, M. O., Sánchez, V. & Tellado, B. (2011) Kubik: Open building approach for the construction of an unique experimental facility aimed to improve energy efficiency in buildings. Open House International, 36 nº1 63–72

[239] Brandl, D., Schober, H., & Hochenauer, C. (2018). Analysis of Heating Effects and Deformations for a STAF Panel with a Coupled CFD and FEM Simulation Method. Journal of Facade Design & Engineering, 6(3), 116–131. https://doi.org/10.7480/jfde.2018.3.2567

[240] O 'hegarty, R., Kinnane, O., & Mccormack, S. J. (2017). Parametric investigation of concrete solar collectors for façade integration. Solar Energy, 153, 396–413. https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.05.092

[241] Kumar, S., & Mullick, S. C. (2010). Wind heat transfer coefficient in solar collectors in outdoor conditions. Solar Energy, 84(6), 956–963. https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.03.003

[242] Watmuff, J.H., Charters, W.W.S. and Proctor, D. (1977) Solar and Wind Induced External Coefficients for Solar Collectors. Revue Internationale d'Heliotechnique, 2, 56

[243] McAdams, W.H. (1954), Heat Transmission, third ed. McGraw-Hill, New York

[244] Test, F.L., Lessman, R.C.L., Johary, A. (1981). Heat transfer during wind flow over rectangular bodies in natural environment. Transactions of the ASME Journal of Heat Transfer 103, 262–267

[245] ANSYS Inc., Ansys Fluent User's Guide, Release 18.0. 2017

[246] Ayompe, L.M., Duffy, A., McCormack, S.J., Conlon, M., 2011. Validated TRNSYS model for forced circulation solar water heating systems with flat plate and heat pipe evacuated tube collectors. Applied Thermal Engineering 31, 1536–1542. http://dx.doi.org/ 10.1016/j.applthermaleng.2011.01.046

[247] Boudjabeur, S., Harper, C., Elguezabal, P., Garay, R., Chica, J.A., Aranburu, L., … Toledo, C. (2018). Building active steel skin. (BASSE). Grant agreement nº: RFSR-CT-2013 - 00026.

Final report, ISBN 978-92-79-94133-7. ISSN 1831-9424. https://publications.europa.eu/en/web/general-publications/publications

[248] Agencia Estatal de Meteorología. AEMET. Valores climatológicos normales. Bilbao Aeropuerto. http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/datosclimatologicos/

[249] O'Hegarty, R., Kinnane, O., & McCormack, S. J. (2017). Concrete solar collectors for façade integration: An experimental and numerical investigation. Applied Energy, 206, 1040–1061. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.08.239

[250] Taylor, J. (1997) An Introduction to Error Analysis, the Study of Uncertainties in Physical Measurements, 2nd Edition, University Science Books, Sausalito, California

[251] Kalogirou, S. A., Tripanagnostopoulos, Y., & Souliotis, M. (2005). Performance of solar systems employing collectors with colored absorber. Energy and Buildings, 37(8), 824–835. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.10.011

[252] Bonhôte, P., Eperon, Y., & Renaud, P. (2009). Unglazed coloured solar absorbers on façade: Modelling and performance evaluation. Solar Energy, 83, 799–811. https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.11.014

[253] Gunjo, D. G., Mahanta, P., & Robi, P. S. (2017). CFD and experimental investigation of fl at plate solar water heating system under steady state condition. Renewable Energy, 106, 24–36. https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.12.041

[254] Chen, Z., Furbo, S., Perers, B., Fan, J., & Andersen, E. (2012). Efficiencies of flat plate solar collectors at different flow rates. In Energy Procedia. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.11.009

[255] Burch, J., Christensen, C., Salasovich, J., & Thornton, J. (2004). Simulation of an unglazed collector system for domestic hot water and space heating and cooling. Solar Energy, 77, 399–406. https://doi.org/10.1016/j.solener.2003.12.014

[256] Medved, S., Arkar, C., & Černe, B. (2003). A large-panel unglazed roof-integrated liquid solar collector-energy and economic evaluation. Solar Energy, 75, 455–467. https://doi.org/10.1016/j.solener.2003.09.009

[257] UNE-EN 12975-2:2006 Sistemas solares térmicos y componentes. Captadores solares. Parte 2: Métodos de ensayo.

[258] UNE-EN ISO 9806:2020. Energía solar. Captadores solares térmicos. Métodos de ensayo. (ISO 9806:2017)

[259] Rodríguez-Hidalgo, M. C., Rodríguez-Aumente, P. A., Lecuona, A., Gutiérrez-Urueta, G. L., & Ventas, R. (2011). Flat plate thermal solar collector efficiency: Transient behavior under working conditions. Part I: Model description and experimental validation. Applied Thermal Engineering, 31 (14–15), 2394–2404. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.04.003

[260] Rodríguez-Hidalgo, M. C., Rodríguez-Aumente, P. A., Lecuona, A., Gutiérrez-Urueta, G. L., & Ventas, R. (2011). Flat plate thermal solar collector efficiency: Transient behavior under working conditions part II: Model application and design contributions. Applied Thermal Engineering, 31(14–15), 2385–2393. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.04.003

# CAPITULO IV. Campaña experimental en condiciones reales de uso de la fachada activa


1. INTRODUCCION
2. OBJETIVOS DE LA EXPERIMENTACIÓN
3. DEFINICIÓN DE LA CAMPAÑA EXPERIMENTAL EN KUBIK
4. METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE DATOS
5. DETALLE DE LA CAMPAÑA EXPERIMENTAL
6. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA CAMPAÑA EXPERIMENTAL
7. CONCLUSIONES
8. REFERENCIAS

*En este cuarto capítulo se investigan las prestaciones de un prototipo de fachada solar en condiciones reales de funcionamiento. Se presentan los resultados de la campaña experimental llevada a cabo en el edificio KUBIK®, evaluando la fachada solar como elemento principal y su interacción con un sistema completo de producción de calor operado por una bomba de calor. Este programa experimental permite caracterizar los elementos principales del sistema demostrando los beneficios que se obtienen al combinar ambos componentes: mejora sustancial del rendimiento de la fachada y valores de COP muy competitivos en la bomba de calor.*

# 1. INTRODUCCION

El proceso de definición de la tesis ha comenzado con la revisión y análisis del estado del arte, concluyendo con la identificación de la oportunidad que supone la solución tecnológica de las fachadas solares térmicamente activas resueltas en acero. En el segundo capítulo se ha profundizado en esa idea y, tomando como referencia la experiencia de un proyecto de investigación colaborativa financiado por la Comisión Europea, se ha propuesto un diseño específico basado en la tecnología de los paneles sándwich resuelto con chapas de acero. A continuación, se han valorado aquellos aspectos que son de mayor interés para que este sistema se comporte como un colector solar y se ha propuesto analizar en detalle las implicaciones que el diseño y modo de funcionamiento de esta solución tiene en la respuesta activa de la fachada.

Por tanto, el tercer capítulo ha llevado a cabo un análisis paramétrico del sistema de fachada activa, permitiendo así valorar alternativas de diseño y cuantificar y comprender adecuadamente el efecto que estas variaciones en la definición del sistema implican en cuanto a la respuesta que se pretende obtener de la solución. Para poder llevar a cabo dicho estudio paramétrico se ha definido, desarrollado y validado un modelo fluidodinámico que ha permitido simular múltiples configuraciones y conceptos alternativos, pudiendo distinguir aquellos factores que tienen una mayor influencia de los que cobran menor relevancia. Se trata, por tanto, de una investigación detallada que ha permitido comprender y considerar las implicaciones que los factores de diseño y de operación tiene en el proceso de transferencia térmica entre los componentes del sistema, tomando como elemento de estudio la fachada activa.

El siguiente paso en el proceso de análisis de la solución es el del estudio y análisis de la energía realmente aprovechable que el sistema es capaz de proporcionar como un elemento que contribuya a incorporar energía solar renovable contribuyendo así a las necesidades de los edificios. De esta forma se pretende valorar y contextualizar las capacidades y potencial de estas soluciones con el fin de ayudar a valorar la ventaja real que pueden llegar a suponer este tipo de soluciones.

Por tanto, en este cuarto capítulo de la tesis se va a investigar el comportamiento del panel solar activo en condiciones reales de uso contemplando no sólo el panel, sino también, los elementos que componen el circuito solar y el sistema de producción de calor. Para ello, se cuenta con una extensa campaña experimental en la que se ha analizado la respuesta del sistema, permitiendo valorar tanto la energía obtenida de la fachada activa como parte de un circuito solar aislado, como de la combinación de dicho circuito solar con una bomba de calor, proporcionando así una oportunidad para estudiar la respuesta de ambas tecnologías cuando trabajan de forma conjunta.

El análisis presentado se basa en la campaña experimental llevada a cabo en KUBIK ®, por lo que, en los primeros apartados, se va a introducir el proceso desarrollado para diseñar, monitorizar y analizar los datos que son relevantes para el objetivo del experimento. Se trata principalmente de la energía captada por la fachada solar expresada como producción obtenida en kWh y los rendimientos que se consiguen tanto para el colector solar integrado como para la bomba de calor. Cabe destacar, también, que una parte de esta información asociada a la experimentación ya ha sido parcialmente anticipada en el capítulo III previo, puesto que, algunos de los datos

registrados y que describen el comportamiento del panel, se han empleado para validar el modelo CFD desarrollado, así como para obtener las curvas características.

De esta forma, en este caso se va a describir la experimentación realizada comenzando con el objetivo con el que se planteó la misma, que no era otro que el de analizar el comportamiento del nuevo sistema de fachada trabajando de diferentes modos, en cuanto a producción y demanda térmica acoplada y bajo condiciones ambientales diversas. Con esta aproximación se busca, por un lado, validar el diseño demostrando que la energía que se obtiene a través del mismo es significativa y que fluctúa en función de las condiciones de trabajo, en línea con el estudio paramétrico previo y, por otro lado, se quiere analizar también los rendimientos del sistema completo cuando se completa el sistema de producción de calor con la bomba de calor, buscando replicar situaciones reales de funcionamiento del conjunto.

En los primeros apartados de este capítulo se va a presentar el escenario y la metodología adoptada para desarrollar los ensayos, describiendo las diferentes configuraciones, magnitudes recogidas y tratamiento de la información del tal forma que se defina el experimento completo. A continuación, se presentarán los resultados más significativos de la campaña experimental, diferenciando el caso de la fachada activa como elemento independiente, del sistema combinado de fachada activa junto con la bomba de calor.

Como conclusión, los datos experimentales obtenidos y analizados en este caso ofrecen un nivel mayor de definición y concreción frente al estudio paramétrico basado en la modelización, en lo que respecta a la viabilidad y potencial de las fachadas activas planteadas como una solución interesante en términos de energía proporcionada y rendimiento asociado. Esta información será la base para desarrollar un caso de aplicación a un edificio completo, en línea con la progresión planteada en el transcurso de la tesis en la que se ha comenzado a escala de material, para ir sucesivamente progresando hasta el panel, el circuito solar, el sistema de producción de calor y finalmente el edificio. De esta forma se pretende analizar y valorar, en cada una de esas escalas de análisis, la contribución del sistema en términos de energía renovable aprovechable.

Finalmente, destacar que las investigaciones desarrolladas y presentadas en este Capítulo V han sido publicadas en revistas internacionales de reconocido prestigio, [261], [262], [263].

# 2. OBJETIVOS DE LA EXPERIMENTACIÓN

El objetivo principal que se persigue a través de la experimentación planteada es el de proporcionar información real y fiable del comportamiento de una fachada solar térmicamente activa mediante paneles sándwich de acero, como el que se desarrolla en esta tesis. Se trata, por tanto, de proporcionar evidencias e información cuantitativa que permita analizar la solución propuesta como una alternativa viable que contribuya de forma significativa a la mejora de la eficiencia energética del sector de la edificación, a través de la incorporación de fuentes renovables de energía y, especialmente, enfocada al ámbito de la rehabilitación.

Este objetivo se define en mayor detalle con otros dos objetivos explícitos con los que se enfoca el desarrollo de la experimentación:

- Analizar el comportamiento de la fachada activa funcionando como un colector solar desacoplado. Es decir, la fachada solar se combina con depósito de almacenamiento térmico para conformar un circuito solar, pero dicho circuito se encuentra aislado y no se combina con ningún elemento que demande energía y que por tanto reduzca el calor almacenado en el circuito solar.
- Ampliar el ámbito de actuación del caso anterior conectando el circuito solar a una bomba de calor que a su vez proporciona agua caliente para producción de ACS (Agua Caliente Sanitaria) y para calefacción. De esta forma se consigue aprovechar la energía conseguida a través del sistema de fachada activa para una aplicación real en edificación.

Para el desarrollo del programa experimental se cuenta con el sistema que se instaló en KUBIK® tras la conclusión del proyecto BASSE [264], sistema sobre él se definido la experimentación propuesta. Este equipamiento experimental proporciona una oportunidad única para llevar a cabo el estudio ya que cuenta con los dos elementos principales que se quieren analizar: la fachada activa y, conectada a esta, la bomba de calor.

Además de estos dos elementos principales, resultan necesarios otra serie de componentes relevantes para completar y operar el sistema como acumuladores térmicos, intercambiadores de calor, válvulas de actuación etc. Entre estos, tiene una relevancia significativa el sistema de control, un elemento que supervisa y gestiona el correcto funcionamiento de toda la instalación a través de una combinación eficiente de los componentes. Por tanto, existirá también una relación directa entre la respuesta del sistema y la forma en la que el control lo gobierna. La solución del sistema de control es un concepto que ha tenido que ser diseñado a medida para esta implantación y se describirá en detalle en el apartado correspondiente.

# 3. DEFINICIÓN DE LA CAMPAÑA EXPERIMENTAL EN KUBIK

Este apartado proporciona una descripción general del sistema implantado en KUBIK®, enfocado principalmente a aquellos aspectos que resultan relevantes para el estudio que se ha planteado y cuyo objetivo ha sido descrito en el apartado anterior. Así, se comenzará describiendo el edificio y su ubicación, se indicarán las cargas térmicas consideradas para el experimento, el esquema de principio del sistema combinando fachada activa y la bomba de calor, para concluir exponiendo en qué consiste el sistema de control y la forma en la que éste se va a emplear en los ensayos propuestos.

## 3.1. Descripción y Localización del edificio

El edificio KUBIK® de Tecnalia es un edificio experimental orientado a actividades de I + D destinadas al desarrollo de nuevos conceptos, productos y servicios con un claro enfoque al ámbito de mejora y de la eficiencia energética de los edificios. Inaugurado en el año 2011, el edificio cuenta con una amplia flexibilidad que permite configurar diferentes escenarios realistas para el análisis de la eficiencia energética de elementos constructivos aislados o acoplados, contemplando la envolvente, los forjados y las particiones, así como su conexión con los sistemas de iluminación y climatización del edificio. Este es un aspecto diferenciador que le da a KUBIK® la singularidad para estudiar y analizar de forma específica el rendimiento de las soluciones en diferentes escalas, desde una habitación hasta el edificio completo. El equipamiento experimental se completa con una plataforma para la monitorización y control de sistemas e instalaciones del edificio, equipamiento de especial interés para el caso del sistema que se va a analizar en este capítulo.

Las pruebas y ensayos desarrollados en la campaña experimental están completamente determinadas por la ubicación geográfica del edificio en Derio (Bizkaia) y las condiciones climáticas asociadas, puesto que la producción solar del sistema activo que se está analizando dependerá de las condiciones ambientales exteriormente que tal y como se ha descrito en el capítulo tercero quedan fundamentalmente representados por 3 parámetros: radiación solar, temperatura ambiente y velocidad del viento.

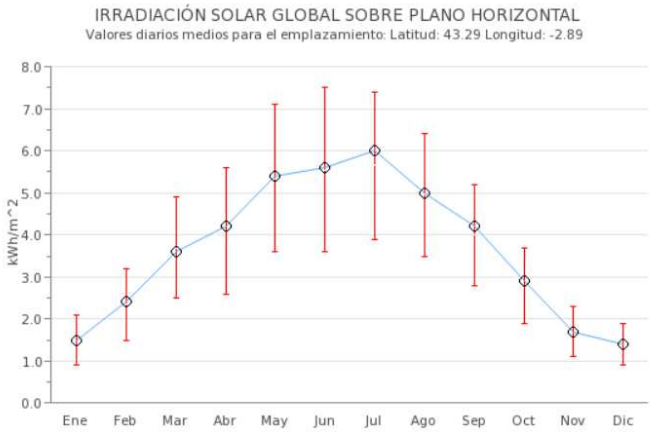
Con una ubicación precisa de 43° 17′ 44,8” N / 2° 52' 17,1” W el clima del lugar se corresponde con el clima característico de la cornisa cantábrica, siendo catalogado como clima templado cálido, Cfb según la clasificación Köppen-Geiger [265].

**Figura 93. Vistas exteriores del edificio KUBIK®. Fachada sur (arriba). Fachadas norte y oeste (abajo-izquierda) y fachadas norte y este (abajo - derecha).**

Los datos históricos del clima en Derio son los que se presentan en la Tabla 29 de acuerdo con la información recopilada por la Agencia Estatal de Meteorología AEMET [266]. Los datos, presentados en una resolución mensual, corresponden a los valores normales para el periodo 1981 – 2010 de la estación meteorológica del aeropuerto de Bilbao, ubicada a una distancia de 2,9 km del edificio KUBIK®.

| Mes | Temperatura media mensual (°C) | Número medio mensual de horas de sol (h/mes) |
|---|---|---|
| Enero | 9,3 | 85 |
| Febrero | 9,7 | 97 |
| Marzo | 11,5 | 132 |
| Abril | 12,6 | 138 |
| Mayo | 15,7 | 169 |
| Junio | 18,4 | 180 |
| Julio | 20,4 | 186 |
| Agosto | 20,9 | 179 |
| Septiembre | 19,2 | 160 |
| Octubre | 16,4 | 126 |
| Noviembre | 12,4 | 88 |
| Diciembre | 9,9 | 78 |
| Medias anuales | 14,7 | 1.610 |

**Tabla 29. Promedios mensuales de temperatura y horas de sol en Derio. Datos estadísticos 1981-2010. [266]**




| (kWh/m$^2$) | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Percentil 75 | 2.1 | 3.2 | 4.9 | 5.6 | 7.1 | 7.5 | 7.4 | 6.4 | 5.2 | 3.7 | 2.3 | 1.9 |
| Valor medio | 1.5 | 2.4 | 3.6 | 4.2 | 5.4 | 5.6 | 6.0 | 5.0 | 4.2 | 2.9 | 1.7 | 1.4 |
| Percentil 25 | 0.9 | 1.5 | 2.5 | 2.6 | 3.6 | 3.6 | 3.9 | 3.5 | 2.8 | 1.9 | 1.1 | 0.9 |

**Figura 94. Distribución anual de la radiación en el plano horizontal para el emplazamiento del edificio KUBIK®. Valores medios diarios para cada mes. [267]**

En cuanto a la radiación solar disponible en esta localización, los datos estadísticos medios basados en dos fuentes [267][268] diferentes indican un rango de 3,54 – 3,65 kWh/m$^2$ de media diaria para la radiación horizontal. La Figura 94 muestra la distribución a lo largo del año para la ubicación indicada.

Con el objetivo de poner contextualizar esos aproximados 1.300 kWh/m$^2$ anuales, se presentan a continuación dos atlas de radiación solar para Europa y otro más específico para el caso de España, basados ambos en datos históricos asociados a la ubicación. Se puede por tanto concluir que, respecto del resto de Europa la energía solar disponible en Derio se puede considerar cerca de la media, siendo, sin embargo, una de las zonas con medios radiación a escala nacional.

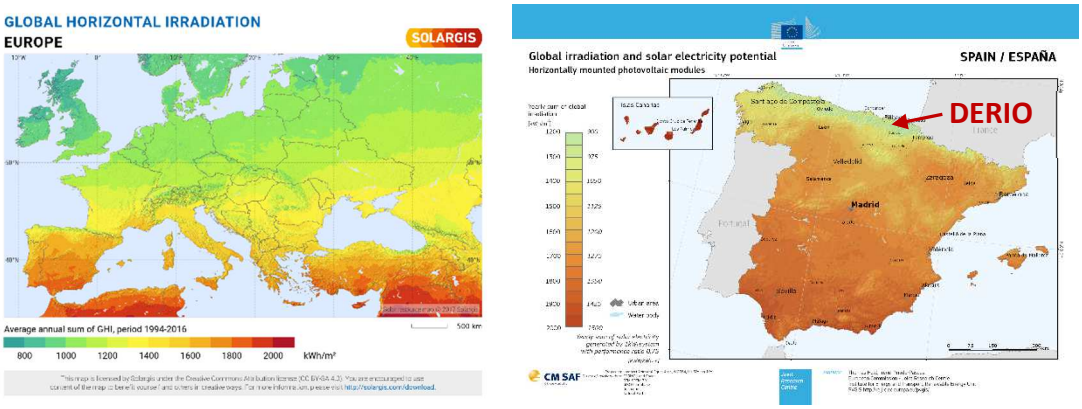



**Figura 95. Mapa solar de radiación horizontal de Europa (izquierda) [269] y de España destacando la localización de KUBIK® en Derio (Derecha) [270]**

### 3.1.1. Implantación del sistema en el edificio. Programa experimental

Para la implantación del experimento en el edificio, se dieron una serie de limitaciones en cuanto a superficie disponible, tanto en planta dentro del edificio como en la fachada exterior. Este es un escenario que se da habitualmente en las obras de construcción y, muy especialmente, en las de rehabilitación, por lo que se considera una representación fiel a la realidad de situaciones en los que la interacción con elementos existentes supone una serie de restricciones a la integración de la fachada y de los equipos térmicos.

Para la combinación del nuevo sistema con las instalaciones existentes, se planteaban dos opciones: o conectarlo al sistema centralizado de calor del edificio o resolverlo de forma aislada. El primero supone una solución más integrada del sistema y una correcta gestión de las distintas fuentes de energía supondría a priori un mejor aprovechamiento del sistema de colectores combinado con la bomba de calor. Por el contrario, el sistema de control resulta más complicado y se requiere una conexión física entre los componentes del nuevo sistema y el sistema centralizado, conexión que no siempre es directa y que de nuevo puede verse condicionada a las limitaciones del sistema existente.

En este caso, el esquema adoptado para la implantación del sistema en KUBIK® fue el de un sistema completo en isla. La principal motivación para este enfoque vino asociado a la ubicación de la fachada activa, puesto que fue el primer aspecto a considerar priorizando una ubicación ventajosa de la fachada activa en la superficie de fachada en la orientación sur, en la zona que más radiación recibe y respetando las zonas acristaladas existentes en el edificio antes de la intervención. Esta decisión supuso una serie de limitaciones para resolver la conexión del sistema con la instalación centralizada del edificio (ubicada en el sótano) requiriendo de un trazado de longitud considerable y ejecución más compleja y costosa. Debido a estas limitaciones físicas, así como a restricciones en el presupuesto se desestimó el sistema conectado al resto de equipos de producción del edificio. Como alternativa, se planteó una instalación independiente de la del edificio ubicando la bomba de calor cerca de los colectores, con lo que las pérdidas de distribución también se reducían, completando el sistema con todo el resto de los componentes necesarios para conformar la solución propuesta de tal forma que, se dotaba al programa experimental de todos los elementos tecnológicos y constructivos necesarios para llevarlo a cabo.

Por todo ello, en el esquema considerado para la implantación en el edificio KUBIK® del sistema mixto de fachada activo junto con la bomba de calor se emplearon superficies tanto en planta como en la fachada. La relación de los espacios que finalmente fueron empleados y que requirió el sistema para esta implantación son los siguientes:

- Para la fachada exterior: 18 $m^2$ de superficie activa, orientada al sur, 21,29 $m^2$ si se consideran los remates perimetrales que rodean al conjunto de paneles, pero que no cuentan con el sistema hidráulico integrado, por lo que dicho exceso se considera superficie "no-activa". El soporte sobre el que se montan los paneles es la fachada original del edificio y se compone de paneles de hormigón prefabricado en las plantas primera y segunda del edificio. Los dos huecos existentes en la envolvente fueron anulados y aislados convenientemente.
- Superficie interior dentro del edificio: Superficie total de 67,9 $m^2$ en la planta primera del edificio para ser calefactada, de los cuales 12,4 $m^2$ es la superficie empleada a modo de cuarto técnico en el que se instalaron los componentes tecnológicos que componen el sistema, a excepción de la fachada activa y los elementos de distribución. Por tanto, 55,5 $m^2$ será la superficie libre de uso en la que se generará la demanda energética principal y 12,4$m^2$, la del cuarto técnico, pero, puesto que ambas zonas se encuentran conectadas, la suma de las dos estancias es el espacio considerado para acondicionar y calentar a través del sistema de climatización.

La distribución interior queda representada a través del siguiente esquema en el que se aprecia que de las nueve celdas (salas de experimentación acondicionada) en las que se divide una planta del edificio KUBIK®, en este caso el primer piso, se han utilizado un total de cinco, cuatro para el espacio libre a climatizar (M2, S2, M3 y S3) y una quinta (S1) en la que se instalan los equipos y se utiliza a modo de cuarto técnico.

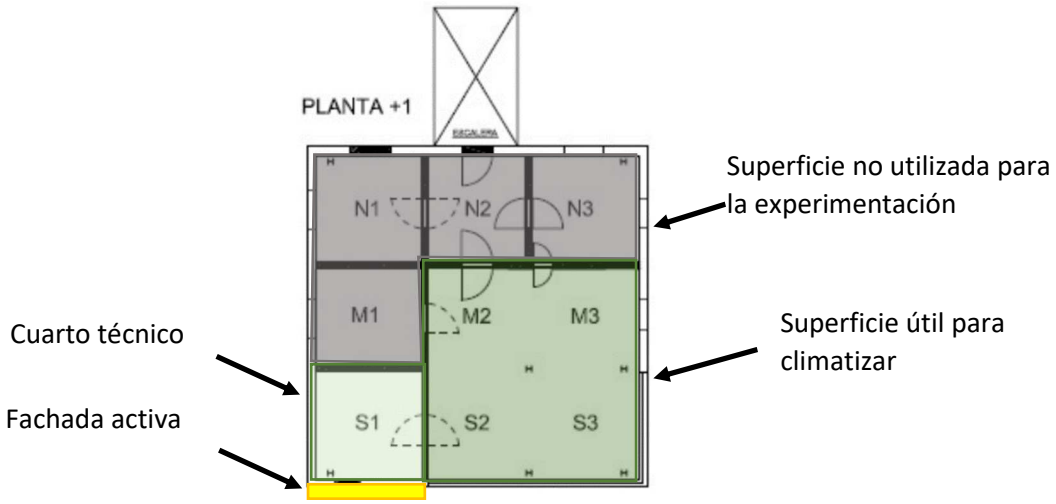



**Figura 96. Distribución en planta de los diferentes espacios empleados en la planta 1 dentro del edificio KUBIK®, así como para el montaje de la fachada activa en la fachada sur exterior**

**Figura 97. Estado de la fachada sur del edificio KUBIK® antes y después del montaje de los paneles activos**

Por otro lado, desde el punto de vista exterior, la siguiente imagen refleja las zonas principales descritas tanto en cuanto a la fachada activa empleada (recuadro amarillo discontinuo), así como el espacio interior a calefactar (recuadro verde continuo).

**Figura 98. Vista desde el exterior de las fachadas este y sur del edificio Kubik®. Se destaca el área empleada para la instalación de la fachada activa (recuadro amarillo discontinuo) y la estancia que será aclimatada con este sistema (recuadro verde continuo)**

### 3.1.2. Cargas térmicas consideradas

El sistema está definido para cubrir dos cargas térmicas, la producción de Agua Caliente Sanitaria (ACS) por un lado y la climatización por aire de la zona reservada a tal efecto. En la siguiente Figura 99 se puede ver la conexión del cuarto técnico con estas dos cargas.

Para el caso del ACS, al no existir una demanda real de este tipo en el edificio, la carga se simula abriendo una válvula de un circuito abierto, de tal forma que el agua de red pasa a través del tanque de acumulación de ACS dentro del cuarto técnico, para una vez calentada, ser posteriormente vertida a un sumidero. Tanto el punto de impulsión como el de retorno del circuito se encuentran en la celda N2.

Para el caso del sistema de ventilación, el aire que se toma de la calle pasa a través de una batería de intercambio aire agua, que lo calienta para ser posteriormente impulsado hacia la zona de las celdas a climatizar (celdas M2, M3, S2 y S3) donde se distribuye a través de difusores en el techo.

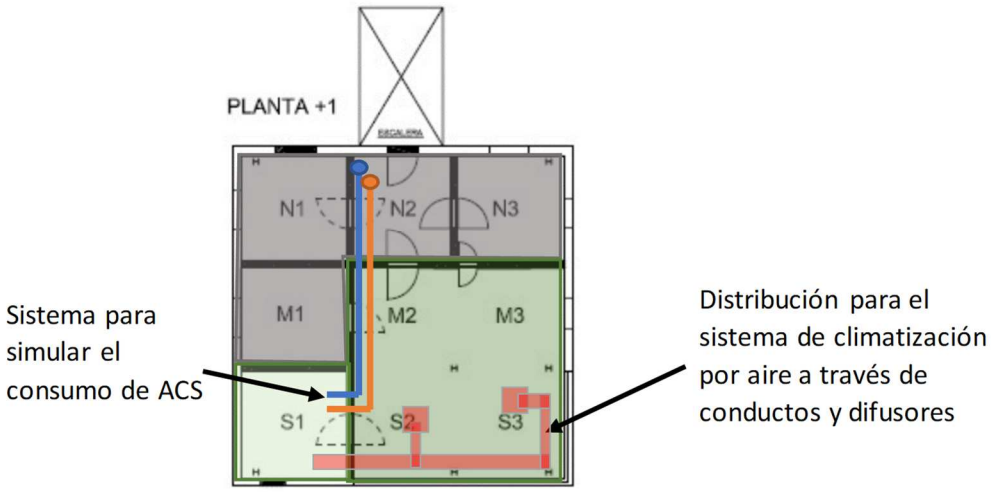



**Figura 99. Vista en planta de los trazados de las cargas para el sistema simulado de ACS y el sistema de climatización por aire**

**Figura 100. Detalle de los trazados del sistema de distribución por el techo del sistema de ventilación (izquierda) y de los conductos en pared para simular en consumo de ACS (derecha)**

En la Figura 100 se puede apreciar el trazado de estos dos sistemas. En el caso del sistema de climatización (lado izquierdo) se aprecian en el techo de la zona de ensayos los conductos de

distribución y los difusores como elementos terminales. Para el caso del sistema de ACS simulado (lado derecho) se destaca el trazado en paralelo de las tuberías de impulsión y retorno adheridas a la pared de la zona de ensayos.

### 3.1.3. Esquema de principio del sistema combinando fachada activa y bomba de calor

La combinación de la fachada activa con una bomba de calor agua – agua caracteriza y representa la singularidad principal del sistema de producción propuesto. Se trata por tanto de un sistema de Bomba de Calor Asistido por Energía Solar (SAHP por sus siglas en inglés) [271], energía solar que es aportada por los paneles activos en fachada que, puesto que se basan en una tecnología de colector no vidriados, proporcionaran energía de baja temperatura. Como consecuencia, la solución estará diseñada para proporcionar aire caliente y agua caliente sanitaria (ACS), siendo la bomba de calor la que alimenta estas dos cargas como generador principal de energía térmica.

De esta forma, las características principales del conjunto son:

- El circuito solar compuesto por los colectores solares integrados en la fachada activa junto con el tanque de almacenamiento se acopla al evaporador de la bomba de calor, siendo éste el origen del principal aporte de calor en el lado de la fuente. Como complemento, se instala en serie con el depósito solar un sistema de recuperación de calor del aire, que aprovecha parte de la energía que se extrae de la habitación, para conseguir un pequeño aporte de calor adicional. El sistema contará por tanto con la flexibilidad para combinar estos dos elementos mediante un par de válvulas de tres vías.
- En el lado de la carga de la bomba de calor, la energía que sale del condensador es dirigida, por otra válvula de tres vías, bien al sistema de ACS o bien al sistema de calefacción por aire. De forma específica, el agua caliente pasa por un intercambiador de calor aire-agua para calentar el aire que entra en la habitación, o por el tanque de almacenamiento de ACS. Dependiendo de las necesidades y la estrategia para satisfacer la demanda, se produce calor para dar respuesta a una de estas dos cargas en cada momento sin que sea posible cubrirlas de forma simultánea.
- El esquema finalmente instalado cuenta con una funcionalidad añadida, con la que se consigue que la bomba de calor funcione en modo frío, haciendo que el sistema sea externamente reversible. Esto se consigue a través de una reconfiguración del circuito intercambiando los elementos de los lados de la fuente y de la carga. De esta forma se posibilita la conexión del evaporador al módulo de impulsión de aire enfriándolo, a la vez que el condensador se conecta bien al módulo de extracción de aire o al tanque de ACS, según el caso. Puesto que este modo de operación no obtiene beneficio de la fachada activa, debido al bajo nivel de temperatura con el que se trabaja (<60°), no se va a tener en consideración para el desarrollo del plan experimental.
- El consumo eléctrico viene asociado a la energía eléctrica demandada por la bomba de calor, como principal consumidor. Sin embargo, se dan una serie de consumos adicionales asociados a la bomba de circulación del circuito solar (para hacer que el

fluido pase por la fachada solar), así como a los equipos intercambiadores de calor aire-agua integrados en los módulos de impulsión y de extracción de aire.

Para completar el sistema de producción de calor resultan necesarios, además de estos elementos principales, una serie de componentes adicionales con los que se completa el sistema hidráulico requerido. A continuación, en la Figura 101 se representa el sistema completo en donde, únicamente, se describen los elementos que componen la solución para el modo de calefacción sin detallar el caso de refrigeración. Se trata así de una versión simplificada del sistema completo, con opción de producción de calor, en la que se han omitido una serie de elementos (conductos y válvulas adicionales) con el fin de hacer más comprensible el esquema de funcionamiento. El detalle del sistema completo se presenta de forma somera en la siguiente Figura 104.

El sistema funciona fundamentalmente con agua como fluido calor portador, puesto que la bomba de calor es de tipo agua – agua. De esta forma, todos los conductos, tanto en el lado de la fuente como en el de la carga, así como la conexión el circuito solar, se resuelven mediante tubería de agua. En cuanto a las cargas, el sistema de ACS también funciona por agua mientras que el sistema de distribución para la climatización se resuelve con conductos de aire, requiriendo por tanto de los comentados elementos de intercambio aire / agua para su conexión con la salida de la bomba de calor.

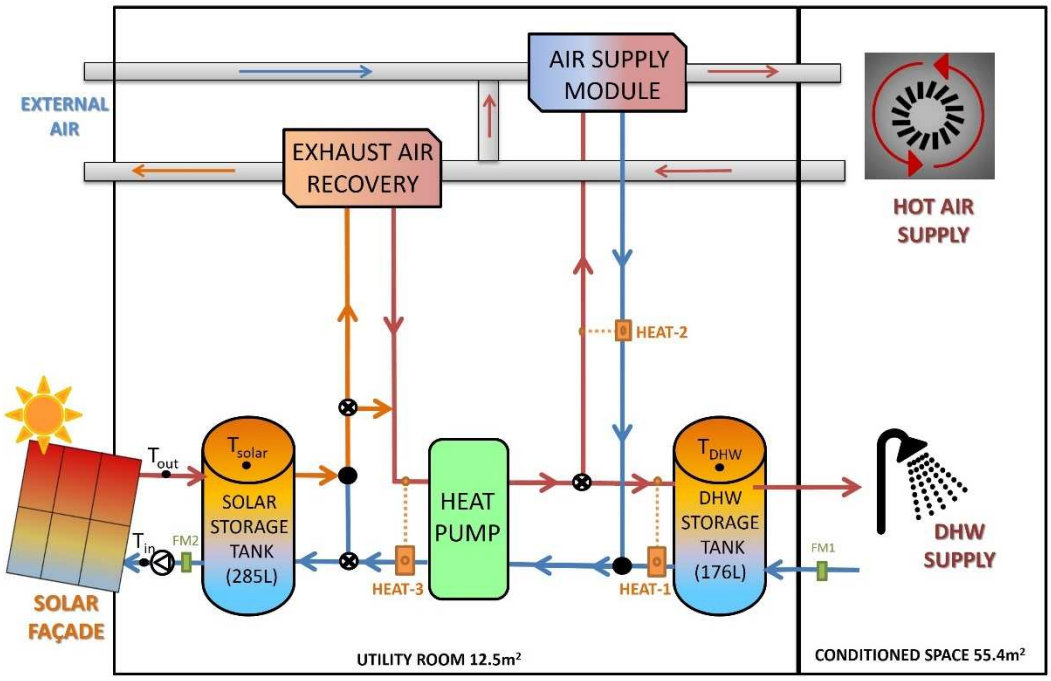



**Figura 101. Esquema del sistema completo en modo calor compuesto por fachada activa, bomba de calor y equipos auxiliares. Versión simplificada describiendo únicamente el modo calor. [261]**

Tal y como se ha indicado, el esquema representado en la Figura 101 es el que se corresponde con el modo de funcionamiento en modo calor y las flechas indican la dirección del flujo en este

modo, pudiendo diferenciarse la impulsión y el retorno entre componentes para este modo. Los elementos principales del sistema descrito son:

- Bomba de calor: bomba de calor eléctrica agua / agua de 6kW de potencia. Modelo F1155 de NIBE [272].
- Fachada Solar Térmicamente Activa: Colectores solares no vidriados integrados en paneles sándwich de acero a modo de fachada activa.
- Bomba de circulación del circuito solar: para hacer circular el fluido a través del circuito solar, desde el tanque solar de almacenamiento hasta los colectores externos. Modelo WILO-Stratos 25 [273], [274].
- Tanque solar a modo de acumulador del circuito solar. Almacena la energía proporcionada por la fachada activa y la envía hacia la bomba de calor (lado de la fuente). Modelo AHPS de NIBE con 285 litros de capacidad.
- Tanque de acumulación de ACS. Almacena la energía producida por la bomba de calor y la acumula dando cobertura a las necesidades en cuanto a consumo de ACS. Por tanto, se conecta al lado de la fuente de la bomba de calor. VPB 200 de NIBE. Capacidad de 176 litros.
- Módulo de suministro de aire: módulos de impulsión de ventilación para calentar la habitación. Batería de intercambio de calor aire / agua. Modelo SAM de NIBE.
- Extracción de aire: módulos de extracción del aire de la habitación con equipo de recuperación de energía a través de batería aire/agua. Modelo FLM de NIBE. Asimismo, se cuenta con un *by-pass* para posibilitar una recirculación del aire extraído hacia el interior, permitiendo una cierta recuperación de calor que supone un leve incremento en la temperatura del aire de impulsión.
- Conductos de aire: tuberías de ventilación que toman aire del exterior y lo llevan al interior a través del módulo de suministro. De forma equivalente, el módulo de extracción actúa en sentido contrario extrayendo el aire de la habitación. Siendo el modo invierno para producir aire caliente, las líneas azules representan el aire frío externo y las rojas el aire caliente del interior.
- Conductos de agua: las conexiones entre todos los componentes del circuito solar (fachada activa y depósito solar), bomba de calor (lado de la fuente y de la carga) así como el sistema para simular el consumo de ACS, se resuelven con tuberías de agua. Las líneas de las flechas representan las conducciones de los fluidos, con mayor intensidad para el rojo con el mayor nivel de temperatura, el naranja y el azul el de menor temperatura. En cada lado, los valores de temperatura serán diferentes. En el lado de la carga el agua se encuentra habitualmente en un rango de 40 a 55 °C y en el de la fuente entre 5 y 20 °C. Aunque en ciertas situaciones el sistema puede también trabajar en valores mayores, para este equipo en concreto no se recomienda alejarse demasiado de estos valores, bien por motivos de seguridad (asociado al posible deterioro de ciertos componentes), o bien por que los rendimientos que resultan son muy poco competitivos.
- Válvulas de tres vías: una en el lado de la carga para dirigir el agua caliente producida a una de las dos cargas. Otras dos en el lado de la fuente permiten conectar el circuito

solar independiente, el módulo de extracción de aire independiente o ambos combinados en serie. La actuación de estas válvulas se realiza de forma motorizada a través de actuadores gestionados por el sistema de control.

- Dispositivos de medición: principalmente sensores de temperatura y caudalímetros para medir temperatura y caudal dentro del circuito. Para recoger los balances de energía en la bomba de calor (carga y lados de la fuente) se cuenta con equipos específicos (contadores de calor) que, combinado salto térmico y caudal, registran el intercambio de energía entre componentes.

La relación detallada de los equipos empleados para el sistema viene recogida en la siguiente Tabla 30. Para el caso de los sistemas de monitorización la información es la presentada en la siguiente Tabla 31.

| Componente | Tipo/Modelo | Descripción / Capacidad |
|---|---|---|
| Bomba de Calor eléctrica | F1155 de NIBE | 6 kW de potencia |
| Módulo de impulsión de aire | SAM 40 de NIBE (2 unidades) | 350 W y 600 $m^3$ de volumen de aire |
| Módulo de extracción de aire | FLM de NIBE (2 unidades) | 350 W y 700 $m^3$ de volumen de aire |
| Bomba circulación circuito solar | WILO-STRATOS 25 | 140 W de potencia nominal |
| Depósito de acumulación ACS | VPB 200 de NIBE | 285 litros de capacidad |
| Depósito de acumulación Solar | AHPS de NIBE | 176 litros de capacidad |
| Actuadores | Belimo | Válvula de 3 vías motorizada + actuador |

**Tabla 30. Descripción de componentes principales del sistema con bomba de calor [274], [275]**

**Figura 102. Vista de la fachada activa exterior (izquierda). Cuarto técnico con bomba de calor y depósitos (derecha). [261]**

| Parámetro | Dispositivo de medida | Tipo/Modelo | Incertidumbre |
|---|---|---|---|
| Temperatura Superficial ($T_s$) – (°C) | RTD – PT100 | Thermo Sensor GmBH | ±0,1 ºC |
| Temperatura del fluido en los conductos y en el tanque del circuito solar ($T_{in}$), ($T_{out}$), ($T_{stu}$), ($T_{stm}$) – (°C) | RTD – PT100 | Thermo Sensor GmBH | ±0,1 ºC |
| Caudal másico ($\dot{m}$) – (l/min) | Caudalímetro ultrasónico | Kamstrupp Ultraflow Multical 801 | ±0,0132 l/seg |
| Radiación ($I_{sol}$) – (W/m$^2$) | Piranómetro | Kipp & Zonen CMP – 6 | ± 5 % |
| Velocidad del viento (U) – (m/s) | Anemómetro | Vaisala WXT520 | ± 3 % |
| Temperatura ambiente ext. ($T_{amb}$) – (°C) | RTD – PT100 | Vaisala WXT520 | ± 0,3 ºC |
| Potencia / Energía térmica (XX) – (kW/kWh) | Contadores de calor | Kamstrupp multical 402 | ± 2.15% |
| Potencia / Energía eléctrica (XX) – (kW/kWh) | Analizador de redes | Carlo Gavazzi EM 200 | ± 1.5% |

**Tabla 31. Descripción del equipamiento empleado para la monitorización [276] – [280]**

**Figura 103. Habitación acondicionada por el sistema de climatización. [261]**

Tal y como se ha indicado, el esquema de la Figura 101 describe de forma simplificada del sistema en la versión para producción de calor. La descripción completa del sistema es la que se presenta a continuación en la Figura 104 en donde se representan todos los componentes que existen en esta solución. Los elementos principales son los mismos en los dos casos, si bien la configuración adaptable del sistema en modo producción de frío o calor implica algunas variaciones. De forma específica, los elementos que, o bien se han simplificado, o no se han representado anteriormente, son los siguientes:

- Las baterías de impulsión y extracción de aire se componen en realidad de dos módulos en cada lado. Asimismo, el sistema de *by-pass* requiere de una pareja de tubos para permitir la recirculación.

- Válvulas de tres vías adicionales para permitir el intercambio de modo frío a modo calor. Además de las 3 válvulas que se han citado anteriormente en el modo de verano (la del lado de la carga que se integra dentro de la propia bomba de calor Nibe), junto con las otras dos en el lado de la fuente (act3 y act7 en la Figura 104), se incluyen 2 parejas más de válvulas para intercambiar el lado de la fuente (act2 y act5 en la Figura 104) por el lado de la carga (act4 y act6 en la Figura 104).
- Válvula *todo-nada* para abrir y cerrar el circuito de ACS y simular el consumo basado en una programación temporal de apertura y cierre de esta válvula a través de un actuador (act1 en la Figura 104).
- Depósito de inercia para incrementar el volumen de agua dentro del circuito en el lado de la carga. Este elemento permite estabilizar al proceso de calentamiento atenuando posibles fenómenos transitorios en el arranque y en las paradas, así como en el cambio del modo de producción de calor a frío y viceversa. Modelo UKV de Nibe de 39 litros de capacidad.
- PLC – Sistema de control. Beckhoff – TW2 [281]: Aunque no se encuentra físicamente en el cuarto técnico si no en otro cuarto de control en el que se centralizan todas las señales monitorizados en la planta del edificio, se ha dotado al conjunto de un sistema de monitorización y control cuya función principal es operar el sistema para garantizar su correcto funcionamiento y adecuada gestión a la vez que monitoriza y almacena múltiples parámetros asociados a la respuesta del sistema. El PLC provisto será el elemento central de este sistema para recoger señales y enviar las órdenes correspondientes para gobernar el conjunto. En el apartado 3.1.4 de este capítulo se presentan más detalles sobre el sistema de control. Además de la conexión con todos los sensores indicados en la Tabla 31, que no están asociados a la estación meteorológica, existe también una conexión de datos entre el PLC y la bomba de calor, a través de protocolo Modbus [282], que permite intercambiar datos para todas las variables que de forma interna registra y gestiona la bomba de calor. Para el caso de aplicación actual se seleccionan una serie de señales (identificadas en la Tabla 32), con las que se transfieren al PLC las lecturas de los sensores internos de la bomba de calor, a la vez que se establece una relación “maestro – esclavo“ entre el PLC y la bomba de calor.
- Sensores adicionales: Con el fin de obtener información más completa y detallada del intercambio de calor entre los componentes, existen una serie de sensores adicionales. Concretamente en los depósitos solar y de ACS (a distinta altura para analizar la estratificación), en los circuitos de agua (tanto en el circuito solar como en el consumo de ACS) en el circuito de aire (impulsión y retorno en el sistema de climatización).
- Para la configuración de verano (producción de aire frío), la dirección del flujo tanto de aire como de agua se mantienen, pero a la vez, las temperaturas de funcionamiento varían dado que el lado de la fuente de la bomba de calor es en este caso el sistema de impulsión de aire y el la carga el sistema de extracción.
- En esta aplicación, el exceso de calor generado en el lado de la carga se emplea para producir ACS en primer lugar o se evacúa al aire exterior cuando las necesidades de ACS están cubiertas.

- Tal y como se ha indicado, el sistema solar está planteado y diseñado para una aplicación de producción de calor, considerado como el modo de funcionamiento principal en el transcurso del año, por lo que la contribución solar no aporta ningún beneficio en términos energéticos en el modo de producción de frío. Por tanto, el circuito solar se desconecta del conjunto cuando el sistema entra en este segundo modo de funcionamiento.

Debido a esta funcionalidad añadida, el sistema de conductos necesario resulta ser significativamente más complejo que si únicamente se hubiera configurado el conjunto para producir calor. La Figura 105 ilustra de forma explícita el nivel de definición que fue requerido para resolver el esquema hidráulico principal del sistema completo.

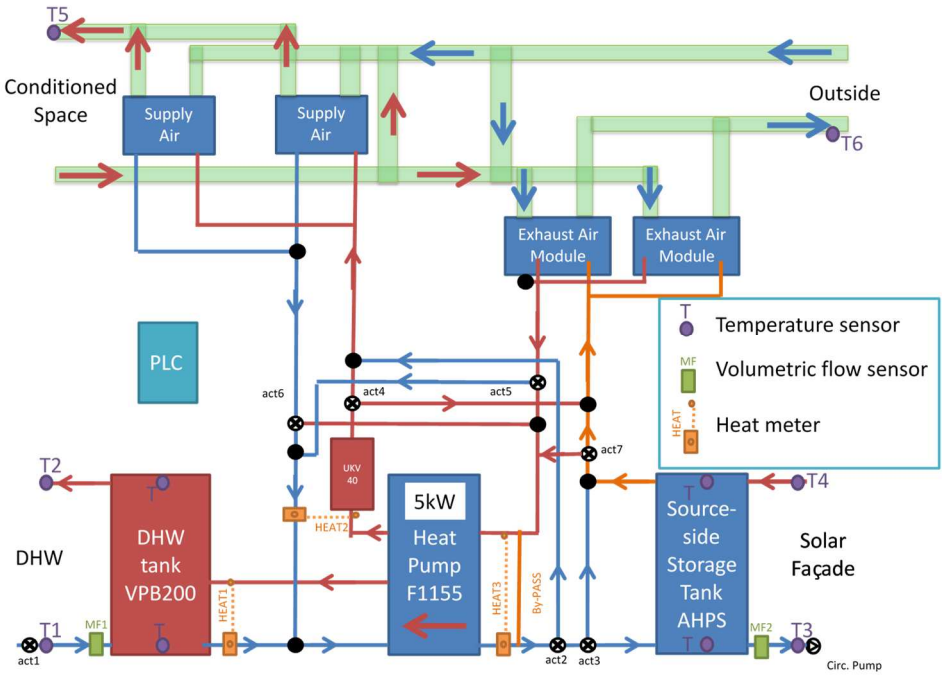



**Figura 104. Esquema del sistema completo instalado que permite hacer reversible el modo calor y configurar el conjunto en modo frío**

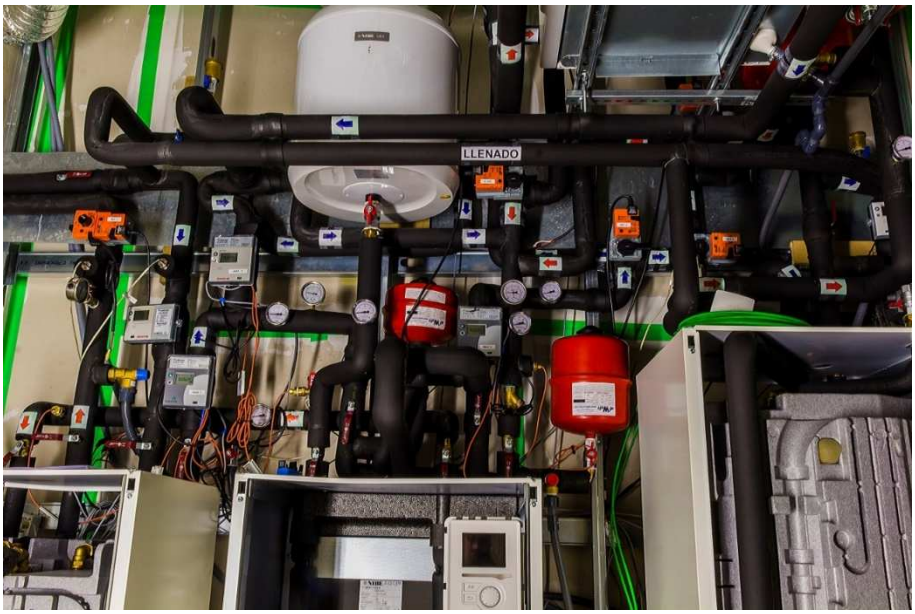



**Figura 105. Representación ilustrativa del nivel de complejidad del sistema hidráulico desarrollado e instalado para permitir flexibilidad y diferentes modos en las conexiones hidráulicas entre los principales equipos. Se recogen la mayor parte de las conexiones entre la bomba de calor y los equipos dispuestos en los lados de la carga y de la fuente**

Para concluir con la descripción del sistema reversible y operación en modo frío, remarcar que este esquema y forma de operar el conjunto queda fuera del ámbito de análisis propuesto para el estudio desarrollado en la tesis. El motivo por el que se ha incluido una breve explicación del sistema, así como un mayor detalle del sistema, es que cierta información asociada al sistema completo (especialmente de la monitorización) va a ser considerada en el análisis posterior.
Sin embargo, puesto que el objetivo principal del estudio es la investigación del uso potencial de la energía captada por la fachada al combinarse con la bomba de calor, y puesto que el colector integrado funciona en rangos de temperaturas bajos, el modo de producción de frío se excluye del estudio en las fases posteriores presentadas a continuación.

### 3.1.4. Sistema de control

El sistema de control en las soluciones activas de fachada resulta ser un componente adicional para integrar al sistema que representan de forma más singular ese comportamiento activo. De forma combinada con el sistema hidráulico, el sistema de control es el que completa la transformación del sistema pasivo de las fachadas tradicionales en una solución activa. Esta activación lleva aparejadas una serie de reglas y algoritmos que implican una actuación sobre el sistema para que éste responda, en función de una serie de señales e información que recibe el sistema de control.

Tal y como se ha comentado en el estado del arte, dependiendo del grado de sofisticación y del diseño de fachada propuesto, se considerarán fachadas activas (sistemas solares principalmente) o adaptativas (con elementos móviles asociados a elementos de sombreamiento, soluciones biomiméticas etc.).

Para el caso propuesto, el sistema de control está diseñado para proporcionar una solución activa. Para ello los requisitos principales que se definen para el controlador, ordenados en orden de prioridad son los siguientes:

- Monitorización: los datos que se registren a través de los sensores y los diferentes dispositivos deben estar disponibles puesto que será esta la información que permita al sistema de control tomar las decisiones oportunas.
- Seguridad: que el sistema pueda ser operado con las garantías mínimas limitado por los límites de seguridad que se establezcan.
- Establecer los modos de trabajo y permitir el cambio entre estos modos de trabajo de forma adecuada. Se trata principalmente de los modos de calor y frío en un primer nivel y de la posible combinación de los componentes que se emplean en cada caso. Para ello el sistema debe proporcionar las respuestas apropiadas para que el circuito se configure al modo de funcionamiento establecido.
- Disponibilidad: una vez que se establece un cambio de modo y/o de componentes a utilizar para operar el sistema, el controlador debe primero verificar que el cambio sea posible revisando el estado de cada componente, así como que las condiciones interiores y exteriores que influyan en cada modo son compatibles con el cambio.
- Eficiencia: el controlador cuenta con una serie de parámetros que pueden ser configurados para incrementar el rendimiento y/o energía aprovechable que se puede obtener del sistema. Partiendo de reglas simples con valores límite a modo de consigna, el nivel de complejidad del módulo de cálculo se puede incrementar significativamente en función de las variables que considere para el cálculo que permita obtener el caso óptimo. El tipo de controlador empleado en este caso es una versión simplificada basada en valores de funcionamiento en cada componente buscando su compatibilidad con los aspectos asociados a la seguridad del sistema.
- Estabilidad: el conjunto requiere asimismo de cierta estabilidad para evitar el envejecimiento prematuro de todos los dispositivos debido a una gran cantidad de ciclos de ENCENDIDO / APAGADO, operación en rangos indebidos etc. Este es un factor que afecta de forma especial la bomba de calor puesto que es el elemento más tecnológico siendo el compresor el elemento más singular.
- Interconexión con sistemas de control y gestión del edificio: finalmente, con el fin de integrar el conjunto en un edificio que cuente con otros equipos y módulos de gestión, resulta necesario que el equipo permita una comunicación lo más amplia posible con dichas soluciones estableciendo los canales y protocolos de comunicación adecuados.

En paralelo, el controlador registra los valores de cada señal proporcionada y los almacena en una base datos que permite su posterior procesado, siendo en este caso la resolución mínima de un minuto.

La estructura principal del sistema de control y su relación con cada uno de los dispositivos y elementos que interactúan con él ha quedado representado en la Figura 104 anterior, en la que el PLC cobra el protagonismo a modo de elemento principal del control. Así, el PLC cuenta con entradas de información a través de los sensores (de temperatura, caudal y energía) y envía órdenes a los elementos sobre los que actúa (actuadores, bomba de calor y bomba de circulación del circuito solar).

El desarrollo del controlador ha dado como resulta un desarrollo específico, concebido para hacer trabajar, bajo diferentes modos de funcionamiento, al sistema combinado compuesto por

la fachada activa y la bomba de calor. Tal y como se muestra en la siguiente Figura 106, la pantalla de visualización de datos permite configurar el sistema a la vez que se presentan los datos instantáneos de las variables monitorizadas. Los datos de estas variables son las que se recogen a su vez en una base de datos y con los que se va a desarrollar el estudio presentado en el apartado 5 de este capítulo.

El diseño en módulos del sistema de control permite configurar el conjunto (bloque *parameter* en la Figura 106 lado derecho), registrar los valores del sistema en los principales elementos, fachada solar, bomba de calor, distribución y depósitos de almacenamiento, (bloque *output* en la Figura 106 en el centro), o directamente escribir de forma manual en el controlador para simular modos diferentes de funcionamiento y poner a prueba el propio sistema de control (bloque *input* en la Figura 106 lado izquierdo).

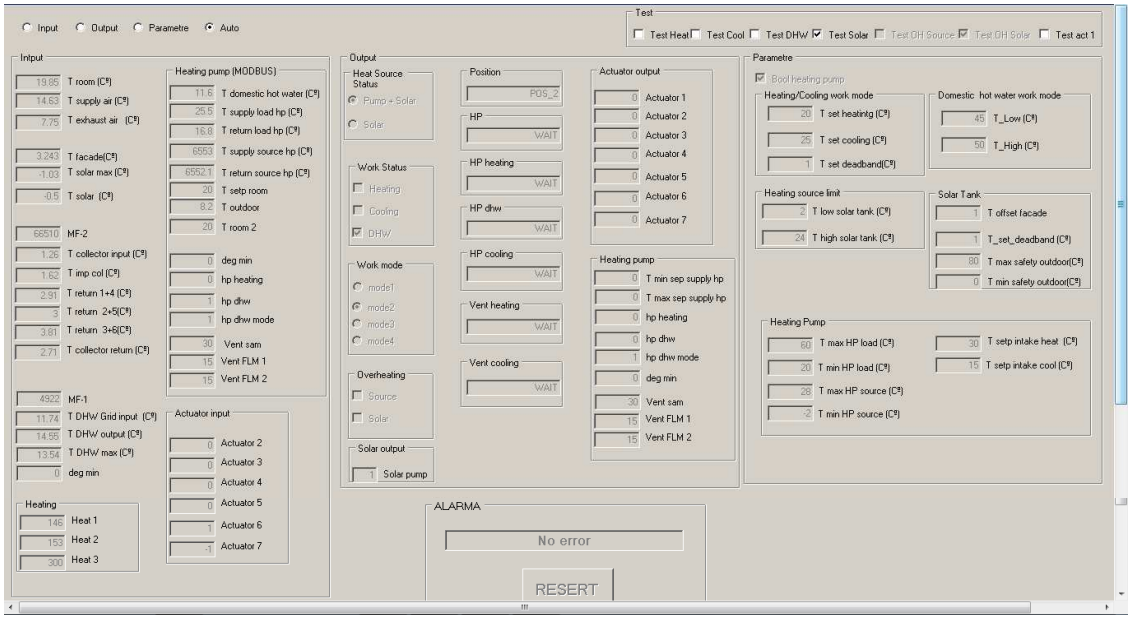



**Figura 106. Pantalla de visualización del sistema de control y de adquisición de datos**

Otro elemento que destacar, respecto al sistema de control, es su concepción basada en módulos. Esta funcionalidad que, se adoptó debido al carácter singular y experimental del sistema, permite operar el conjunto en situaciones de funcionamiento que pongan al límite el sistema en cuanto a las condiciones de seguridad o el rendimiento. De esta forma se puede obtener información más completa que permita caracterizar mejor el sistema.

Este enfoque modular se resume en 7 bloques que habilitan los modos de funcionamiento disponibles:

- Bloque 1: Producción aire caliente.
- Bloque 2: Producción aire frío.
- Bloque 3: Producción ACS.
- Bloque 4: Activación circuito solar.
- Bloque 5: Activación alarma de seguridad del lado de la fuente por sobrecalentamiento.
- Bloque 6: Activación alarma de seguridad por sobrecalentamiento del circuito solar.
- Bloque 7: Activación de la descarga del sistema simulado de ACS.

Debido a las implicaciones que tienen unos bloques sobre otros, existe una relación de dependencia en algunos casos; de forma específica:

- Bloque 1 y Bloque 2 son opuestos. Si 1 está activado 2 estará desactivado y viceversa puesto que la bomba de calor no puede producir a la vez calor y frío.
- Bloque 3 es independiente de los dos anteriores por lo que podrá estar habilitado en paralelo. No obstante, tal y como se ha comentado anteriormente la bomba de calor entregará energía a cada elemento cada vez sin que se puedan cubrir dos cargas combinadas.
- El bloque 5 se activa junto con los bloques 1 a 3, puesto que estos tres están asociados al lado de la carga y el hecho de que estén activados implican el arranque de la bomba de calor. El bloque 5 es una medida de protección para este equipo, de tal forma que restringe al lado de la fuente de la bomba que debe operar dentro de unos límites (entre 0 y 30 °C habitualmente).
- Si se activa el bloque 4 de producción solar generado mediante la fachada activa, se activará siempre junto con la seguridad del bloque 6. La activación de esta pareja de bloques es independiente de los bloques 1 a 3, puesto que el funcionamiento del lazo solar no requiere necesariamente que la bomba de calor esté encendida.

Como consecuencia de este diseño, el sistema de control ofrece flexibilidad para operar y analizar cada bloque por separado (principalmente el sistema de la fachada activa por un lado y, por otro, la bomba de calor acoplada diferentes cargas) así como para utilizar el sistema completo con todos los componentes.

# 4. METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE DATOS

El proceso consiste en el análisis de los componentes principales del sistema, es decir, el panel y la bomba de calor. Por tanto, el estudio se centra en considerar parámetros que representen el comportamiento de estos dos elementos bajo condiciones de funcionamiento diferentes. Para ello, se tomarán aquellos datos que son monitorizados en los diferentes puntos y elementos del sistema que ofrezcan información acerca de la respuesta de la fachada activa y de la bomba de calor.

Por tanto, en este tercer apartado se identificarán las variables a considerar como información representativa del sistema para, posteriormente, describir el proceso experimental mediante el cual se recogen los datos in situ para tratarlos a continuación, buscando en todo el proceso una evaluación de los componentes citados. Este análisis con datos experimentales de la fachada solar se complementa con la modelización y el estudio paramétrico desarrollado en el capítulo III, permitiendo profundizar en el modo de comportamiento del sistema en condiciones reales de uso. Para completar la descripción de la metodología empleada se incluirá al final de este apartado las secuencias y modos de ensayo adoptados.

## 4.1. Variables a considerar

Las variables a considerar son las que se registran a través del sistema de monitorización y que quedan recogidas en la Tabla 32, distinguiendo entre los sensores para monitorizar la fachada activa, la bomba de calor y el resto de los elementos del sistema completo.

La fachada activa representa el componente principal del circuito solar y las variables a considerar son las siguientes:

- Se colocaron un total de 12 sensores de temperatura en la superficie de los paneles activos ($T_s$).
- Se usaron sensores de temperatura adicionales para registrar las temperaturas de entrada ($T_{in}$) y salida ($T_{out}$) del fluido, así como los niveles de temperatura en las partes media y superior del tanque de almacenamiento solar.
- Los caudalímetros (Representados como FM en la Figura 101) registran el caudal másico ($\dot{m}$).
- La radiación solar ($I_{sol}$) en la fachada vertical orientada al sur se registra mediante un piranómetro ubicado en la cubierta del edificio.
- Un anemómetro dentro de una estación meteorológica, también en cubierta, mide la temperatura ambiente externa ($T_{amb}$), la velocidad del viento (U) y la dirección del viento ($D_w$).

Para la bomba de calor:

- El calor suministrado se mide diferenciando la contribución del ACS (medidor de calor 1) de la energía utilizada para la calefacción de espacios (medidor de calor 2). El calor requerido por la bomba de calor que se absorbe a través de su lado fuente se registra mediante el medidor de calor 3. Este calor de bajo nivel es proporcionado por el circuito solar, por el elemento de recuperación de escape o por la combinación de ambos.

- La electricidad consumida por la bomba de calor y el resto de los componentes es registrada por analizadores de redes. Este consumo de la bomba de calor y el resto de los componentes auxiliares se tendrá en cuenta para calcular el COP del sistema completo (ecuación 5).

La Tabla 31 describe el equipo de medición empleado y la Tabla 32 las variables registradas.

| Tipo de Sensor | Parámetro de medida | Nº de señales |
|---|---|---|
| Sensores de temperatura | Temp. superficial de la Chapa ($T_S$) | 12 |
| | Temp. media y superior en el tanque solar ($T_{ST}$, $T_{ST\text{-}S}$) | 2 |
| | Temp. del fluido en el circuito solar ($T_{in}$, $T_{out}$) | 4 |
| | Temp. en el tanque ACS ($T_{DACS}$) | 1 |
| | Temp. del fluido en el circuito ACS ($T_{inACS}$, $T_{outACS}$) | 2 |
| | Temp. del aire de impulsión y extracción ($T_{inA}$, $T_{outA}$) | 2 |
| | Temp. interior ($T_{room}$) | 1 |
| Actuadores (8 uds) | Señal de actuación (1/0) | 8 |
| | Señal de posición (0 – 100) | 6 |
| Equipos específicos | Contador de calor (Heat 1, Heat 2 y Heat 3) | 3 |
| | Caudalímetro (FM 1 y FM 2) | 2 |
| Analizadores de redes (2 uds) | Potencia activa, reactiva y aparente por línea | 18 |
| | Potencia activa, reactiva y aparente trifásica | 6 |
| | Factor de potencia por línea y trifásico | 8 |
| | Energía activa y reactiva acumulada | 4 |
| Señales proporcionadas por el controlador de la bomba de calor (vía Modbus) | Temp. de impulsión y retorno lado de la carga | 2 |
| | Temp. de impulsión y retorno lado de la fuente | 2 |
| | Temperatura de la habitación | 1 |
| | Temperatura de la habitación | 1 |
| | Grados-minuto para regulación | 1 |
| | Velocidad de baterías de aire (SAM y FLM) | 3 |
| | Valor de consigna | 1 |
| | Tipo de producción: Calor / ACS | 2 |
| | Modo de funcionamiento para ACS | 1 |
| Condiciones exteriores | Radiación solar en el plano de la fachada ($I_{sol}$) | 1 |
| | Temperatura ambiente ($T_{amb}$) | 1 |
| | Velocidad y dirección del viento (U, $D_w$) | 2 |

**Tabla 32. Relación de señales monitorizadas con el sistema de adquisición de datos**

## 4.2. Caracterización de los componentes principales del sistema: fachada activa a modo de colector solar y bomba de calor

El objetivo del estudio propuesto busca caracterizar y entender mejor la respuesta de los dos componentes principales del sistema propuesto en condiciones reales de uso: la fachada activa y la bomba de calor. Por lo tanto, se requerirán expresiones válidas para valorar el rendimiento y respuesta de cada componente de forma individualizada.

Tomando como referencia la fachada activa como la principal contribución del análisis experimental propuesto, se plantea el estudio de la fachada activa “desacoplada” y “acoplada”.

En el primer escenario se analiza la fachada de forma individual para lo que se toma en consideración únicamente el circuito solar (fachada activa + tanque de almacenamiento solar en la Figura 101), independientemente del resto del sistema para poder así valorar la capacidad de la fachada activa como colector solar.

A continuación, se estudiará la interacción de la fachada con la bomba de calor trabajando de forma combinada en el modo "acoplado", para lo que el estudio se extiende para considerar todo el conjunto representado en la Figura 101.

Con este doble análisis se puede valorar tanto el potencial de la fachada activa de forma individual, como del sistema combinado cuantificando la cantidad de energía que se puede obtener en cada caso.

La interacción con la bomba de calor permitirá valorar beneficios añadidos en una aplicación que implica mejoras en la respuesta de los dos componentes (el colector y la bomba de calor) gracias a la interacción que se produce entre ambos cuando trabajan bajo un enfoque sinérgico.

### 4.2.1. Fachada activa a modo de colector solar

Para la fachada activa, tal y como se ha descrito en los capítulos II y III de la tesis, se consideran principalmente dos parámetros para representar su comportamiento, el rendimiento (ecuación (6)) y la energía útil extraída (ecuación (7)).

$$\eta = \frac{Q_u}{A_c \, I_{sol}} \tag{36}$$

$$Q_u = \dot{m} \, C_w \, (T_{out} - T_{in}) \tag{37}$$

A través de la monitorización de las temperaturas de impulsión y extracción del fluido junto con el caudal, se puede estimar la energía útil $Q_u$, que, combinada con la radiación incidente recogida por el piranómetro en el plano de la fachada y la superficie activa, representa el rendimiento de la fachada activa como colector solar térmico.

Tal y como se ha comentado también en los capítulos previos, el diseño del sistema activo pretende maximizar estos dos factores por metro cuadrado de fachada activa, de tal forma que se pueda cubrir una parte significativa de las demandas del edificio con energía solar. Sin embargo, dada la relación entre ambos se pueden dar situaciones con buenos rendimientos, pero con potencia útil insuficiente o en el caso contrario, un rendimiento pobre, pero con una buena cantidad de energía extraída. En cualquier caso, la superficie activa del colector será el factor determinante puesto que rendimiento y potencia vienen expresados por superficie y la definición final del sistema se puede hacer ajustando la superficie activa.

Por tanto, resulta necesario caracterizar y cuantificar estos dos parámetros para contribuir así a orientar el diseño de las fachadas activas.

### 4.2.2. Bomba de calor

En lo que respecta a la bomba de calor, el *Coefficient Of Performance* (COP) es el factor habitualmente considerado para valorar su rendimiento. Este factor relaciona la salida térmica extraída del equipo con la electricidad consumida (ecuación (3)). Por lo tanto, para el caso de las bombas de calor eléctricas por compresión, representa cuántos kW de calefacción se pueden generar a partir de 1 kW de electricidad consumido por el compresor. Cuando la bomba de calor se utiliza para la producción de refrigeración, el factor equivalente será el *Energy Efficiency Ratio* (EER), que combina la capacidad de refrigeración y la energía eléctrica consumida.

$$\mathrm{COP} = \frac{Q_H}{\mathrm{W_c}} \tag{38}$$

Para la estimación del COP, el calor entregado por el condensador de la bomba de calor $Q_H$ se registra a través de los contadores de calor Heat 1 y Heat 2 (Figura 101) para la producción de ACS y Calefacción respectivamente. El consumo eléctrico $W_c$ se monitoriza a través del analizador de redes conectado a la alimentación de la bomba de calor.

Dependiendo de los límites que se consideren para la evaluación del sistema completo, se considerará la electricidad consumida únicamente por la bomba de calor (ecuación (38)) o se tendrán también en cuenta los consumos del resto de equipos que tienen un consumo significativo (principalmente equipos de bombeo y ventiladores). Este enfoque de sistema completo es más representativo de las necesidades reales del sistema, lo que implica incrementar el consumo de electricidad indicado en el denominador de la ecuación anterior, y que en consecuencia, implican rendimientos menores (ecuación (39)).

$$COP_{Sys} = \frac{Q_H}{W_C + W_{aux}} \tag{39}$$

$$W_{aux} = \sum_{1}^{n} W_{consumer\ 1} + W_{consumer\ 2} + \cdots + W_{consumer\ n} \tag{40}$$

El consumo de los equipos auxiliares, como bombas de circulación, válvulas accionadas de forma automática, controladores, etc., serán los elementos que tengan asociado un consumo significativo de electricidad en este caso, identificados como $W_{aux}$ (ecuación (40)). Dependiendo de la definición de límites del sistema, se identificarán aquellos componentes a considerar como consumidores de electricidad como elementos significativos del sistema. Como consecuencia, la eficiencia del sistema resultante se calculará de acuerdo con la ecuación (40).

Finalmente, el aspecto a considerar para el análisis de estos parámetros representativos de paneles y bombas de calor será el rango temporal. En función de la resolución de los datos de entrada contemplados, se podrán calcular rendimientos instantáneos o promediados para un periodo de tiempo determinado (horas, días, semanas, meses y años). Asimismo

## 4.3. Programa experimental, secuencias de ensayos y modos de funcionamiento a analizar

Con el fin de evaluar los componentes, se plantean un programa experimental que considera una serie de secuencias de ensayos que permiten comprender y analizar la respuesta de los elementos principales a estudiar. De esta forma, se plantean dos grandes bloques de ensayos:

- Por un lado, se analiza el comportamiento de la fachada activa de forma aislada. Se trata de un estudio específico en el que se monitoriza la respuesta y producción del circuito solar en el que la fachada es el elemento que actúa como colector térmico.
- A continuación, se ensaya el sistema combinando fachada activa con una bomba de calor. De esta forma además de monitorizar la capacidad de producción del sistema combinado, también se puede obtener la contribución de la fachada activa por comparación con el caso anterior.

Mediante esta experimentación se analiza el diseño de fachada activa construido y que ha quedado explicitado a través de la solución materializada en la fachada activa construida e instalada en el edificio KUBIK®. Por tanto, y tomando en consideración el análisis paramétrico planteado en el capítulo III previo de la tesis, los parámetros de diseño tanto para el panel, como para el circuito hidráulico están fijados en este caso y no pueden ser modificados. No obstante, para los parámetros dinámicos, sí que se darán condiciones variables, por lo que se va a definir una experimentación que contemple escenarios alternativos para los factores dinámicos. Asimismo, la cantidad de superficie activa también puede ser adaptada debido a la construcción planteada en la que se han conectado 3 baterías de 6$m^2$ en paralelo, lo que permite contar con 6, 12 o 18 $m^2$ de superficie de fachada solar.

De esta forma y tomando en consideración las conclusiones del estudio de los parámetros ambientales, se planteará el estudio de acuerdo con los siguientes aspectos:

- Para los parámetros dinámicos de configuración (caudal y temperatura de impulsión), se pueden plantear ciertas alternativas en cuanto al modo de operación del sistema, pero, en cualquier caso, tomando en consideración las limitaciones del sistema para alterar estos factores.
    - En el caso del caudal, el tipo y tamaño de bomba instalada en KUBIK® resulta en términos generales demasiado potente, por lo que el caudal mínimo de la misma queda limitado a 0,13 kg/s. Tal y como se ha indicado en el apartado 4.2.1.1 del capítulo III, este caudal se encuentra en el rango superior de operación planteado.
    - Para el caso de la temperatura de impulsión, este factor tiene una serie de condicionantes directamente relacionados con el diseño del sistema (estratificación y aislamiento del tanque) que no pueden ser alterados en esta experimentación. Sin embargo, cuando se opera el sistema combinado con la bomba de calor, la producción de calor para satisfacer la demanda de las cargas térmicas implica que se consume energía del tanque solar, reduciendo así la temperatura de este y obteniendo valores que suponen una reducción significativa de la temperatura de impulsión. En este caso, el control en la regulación de la temperatura no es tan directa como en el caso del caudal ni tan

representativa, por lo que la regulación de este factor se va a hacer de forma indirecta atendiendo a la producción de calor asociada, tal y como se describirá en los siguientes puntos.

- Para los parámetros dinámicos ambientales de configuración (radiación, temperatura ambiente y velocidad del viento), se van a dar escenarios alternativos debidos a las condiciones exteriores variables. En este caso el enfoque consiste en monitorizar dichas variables meteorológicas a través del sistema de monitorización y en desarrollar el análisis posterior de la información, estudiando la influencia entre los parámetros dinámicos ambientales y la relación con el resto de los parámetros considerados.

Tal y como se ha indicado en el caso de la temperatura de impulsión, la carga térmica acoplada al sistema es un aspecto muy relevante a la hora de analizar el sistema. La carga es el elemento que demanda energía en forma de calor, energía que es suministrada por la bomba de calor que, cuando se activa, absorbe energía del depósito solar conectado al evaporador. Esta situación, que se contempla únicamente en el caso del sistema completo y no para el sistema aislado, tiene una influencia directa en el comportamiento y respuesta de los dos componentes del sistema, fachada activa y bomba de calor, tal y como se va a describir en el apartado 5.2 del estudio.

En los siguientes apartados 4.3.1 y 4.3.2, se va a describir en mayor detalle la metodología y consideraciones adoptadas para el análisis de la solución de fachada como elemento aislado y combinado con el resto del sistema respectivamente.

### 4.3.1. Análisis de la fachada activa dentro del circuito solar aislado

Para comprender el potencial del sistema y la producción de energía que puede lograrse con este diseño de fachada activa, se plantea una primera aproximación en la que se analizan los resultados obtenidos a través de una extensa campaña experimental bajo diferentes modos de funcionamiento.

Para este análisis, se toma en consideración el subsistema del circuito solar compuesto por un colector solar conectado a un tanque de almacenamiento térmico (Figura 107), el mismo sistema que se ha considerado en el capítulo III para la validación del modelo CFD. La energía obtenida por el panel se calcula de acuerdo con la expresión presentada en la ecuación (7), y la energía dentro del tanque se controla por medio de la temperatura media registrada por los dos sensores de temperatura.

Las condiciones de trabajo del sistema se estudian para un modo de funcionamiento en circuito cerrado, por lo que el agua circula por el colector cargando y descargando el tanque, intercambiando energía con el ambiente exterior. En esta situación no existe una carga térmica específica asociada que extraiga la energía del circuito solar. La interacción con otros dispositivos es la que se va a analizar a continuación, por lo que en este caso la configuración descrita permitirá estudiar el potencial del circuito cerrado como un elemento aislado.

Por tanto, la cantidad de energía alcanzable estará limitada por la capacidad de la fachada como colector térmico junto con el volumen disponible en el tanque, ya que una vez se alcanza su nivel máximo durante el día, ya no habrá posibilidad de aumentar esa energía debido a que no existe ningún sumidero hasta el momento en el que comienza a bajar la temperatura exterior.

De esta forma, la referencia queda definida por ciclos solares diarios que proporcionan la energía para llenar el tanque, mientras que esa energía puede ser desechada durante la noche.

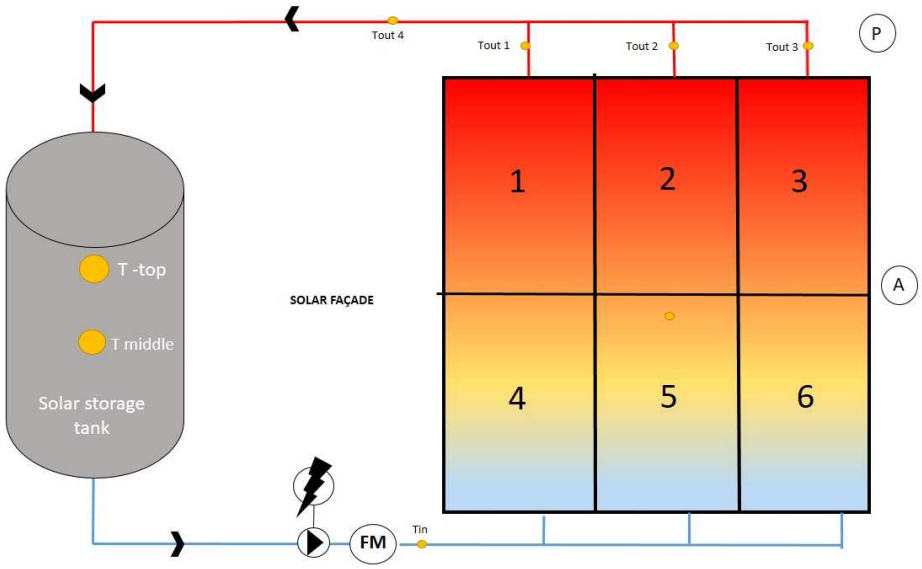



**Figura 107. Esquema del circuito solar con la fachada activa (6 paneles), el tanque solar y la bomba de circulación como elementos principales. [262]**

Para el análisis de la fachada se tomarán dos parámetros principales de medida en función de las condiciones de funcionamiento:

- La producción solar obtenida por la fachada activa de acuerdo con lo establecido en la ecuación (7).
- El rendimiento de la fachada activa expresado como energía obtenida frente a radiación incidente según la ecuación (6).

### 4.3.2. Análisis del sistema combinado

Para el caso del conjunto combinado, el nivel de complejidad del sistema se incrementa y el circuito solar se acopla al sistema de producción de calor, por lo que el esquema a considerar es el representado en la Figura 101. El sistema cuenta con la particularidad de que es una solución de conexión en serie con la fuente de la bomba de calor y, puesto que no existe un *by-pass*, esto implica que no hay posibilidad de operar la bomba de calor sin la contribución del tanque solar que a su vez se carga con el aporte energético la fachada activa.

Por lo tanto, esta configuración del sistema cuenta con unas restricciones y limitaciones y se pueden dar situaciones en las que la capacidad del sistema no sea suficiente como para cubrir las demandas requeridas, debido a la limitación asociada a una baja producción solar.

Este enfoque se ha adoptado de forma consciente, con el fin de analizar y valorar la capacidad del sistema como elemento aislado, siendo este uno de los objetivos principales de la experimentación presentada a continuación. En cualquier caso, y en línea con la forma en la que

habitualmente se diseñan las instalaciones basadas en renovables, añadir un sistema complementario de producción a modo de respaldo, cuando las fuentes renovables no son suficientes, supondría garantizar las necesidades de diseño del conjunto. Para ello, una buena caracterización del conjunto en el que se establezcan los límites y posibilidades del sistema permitirán un mejor dimensionamiento tanto del sistema combinado como del equipo de respaldo.

El objetivo será doble, estudiar y cuantificar el potencial de producción y rendimiento del sistema combinado de fachada activa con bomba de calor y, en paralelo, desarrollar un análisis comparativo en el que se pueda desatacar la contribución de cada componente al sistema para demostrar las sinergias y ventajas de trabajar con soluciones mixtas como la planteada.

En este caso, además de los parámetros ambientales que condicionan la producción solar, los factores que definen la respuesta del sistema quedan directamente asociados a las cargas térmicas que se pretenden satisfacer. Para la consideración de las cargas, los aspectos más relevantes a analizar serán los siguientes:

- Tamaño e intensidad de la carga. Potencia máxima y energía requerida.
- Periodo del día en el que se produce la demanda. Si es durante el día, cuando hay radiación, o por la noche.
- Regularidad de la carga. Si sigue algún patrón de regularidad siguiendo unas pautas o si está sujeta a las condiciones exteriores.
- Simultaneidad entre los momentos de carga y producción de la fachada activa.

La “caracterización” de la carga descrita por su tamaño, intensidad periodo y regularidad, definirá la cantidad de energía que se requiere de la bomba de calor para generar dicha energía con una implicación directa en la extracción de calor del lado de la fuente. Para ello, la bomba de calor extraerá la energía del tanque solar, lo que supone una disminución proporcional de la temperatura del tanque y, a su vez, una reducción de la temperatura de impulsión que, tal y como se ha indicado, afecta al rendimiento y energía extraída por la fachada activa. Por otro lado, la descripción de la relación del sistema activo con el sistema queda representada a través de la capacidad de producción que se ha caracterizado, en el caso del sistema aislado, quedando la posibilidad de modificar en cierta medida la cantidad de energía a través de la configuración del caudal del circuito solar.

Por otro lado, las características de las cargas asociadas al diseño de la instalación serán otro aspecto relevante de cara a considerar las implicaciones que tienen en el rendimiento del sistema. En este caso serán condicionantes asociados a la forma en la que se ha materializado la instalación y que no pueden ser modificados. Se trata concretamente de los siguientes factores:

- El sistema de producción de ACS con un tanque de acumulación acoplado. Esta es una solución muy común en los sistemas operados con bombas de calor, en donde se produce el agua caliente de forma constante a un nivel de temperatura (entre 40 y 60 °C) y se almacena en un depósito o tanque, a modo de acumulador, para cubrir las necesidades cuando se produzca la demanda.
- El sistema de climatización por aire mediante baterías de intercambio de calor. En este caso esta es una de las posibles alternativas para la climatización con bombas de calor, sin que sea considerada tan estándar como la solución adoptada para la producción de

ACS. Debido a que la producción de agua caliente con este tipo de bombas de calor domésticas queda limitada a valores máximos cercanos a 60 °C, las alternativas mediante distribución por agua son más comunes, disponiendo como elementos terminales como los fancoils, suelo radiante o radiadores de baja temperatura. En este caso, cabe mencionar que la solución adoptada para la distribución contaba con ciertas limitaciones en cuanto a la potencia máxima y caudales de impulsión, por lo que la energía final vertida en la habitación no será un factor suficientemente representativo para el estudio y, por tanto, se analizará principalmente la energía entregada al sistema de distribución y las baterías de aire-agua.

De la misma manera, el equipo de recuperación de calor en el aire de extracción implica una pequeña contribución al agua impulsada en el lado de la fuente por lo que la aportación de este elemento deberá ser tenida en consideración también para el análisis.

Asimismo, se plantea un análisis comparativo con el fin de valorar los rendimientos de la fachada activa y de la bomba de calor estudiando dos escenarios diferentes;

- Uno, cuando funcionan como dispositivos independientes, y
- Dos cuando están acoplados en un único sistema.

La extensa campaña experimental llevada a cabo durante varios meses entre los años 2017 y 2018, con condiciones ambientales variables y diferentes modos de operación, ofrece una valiosa oportunidad para desarrollar dicho análisis comparativo.

Para poder contemplar el contraste entre ambos escenarios son necesarios dos requisitos:

1) considerar días equivalentes con respecto a las condiciones ambientales externas, pero
2) con diferentes condiciones de trabajo.

La segunda condición se puede controlar durante el desarrollo de las pruebas experimentales, conectando o desconectando la bomba de calor y alterando los parámetros de configuración, pero la primera se rige completamente por las condiciones climáticas reales y no puede ser controlada.

La revisión de la información registrada durante la campaña experimental ha permitido identificar parejas de días equivalentes que cumplían ambos requisitos, con diferentes modos de trabajo, pero para condiciones ambientales muy similares.

Una diferencia de casi un año en un día claro y soleado ofrece esta posibilidad. En uno el sistema funciona en el modo de trabajo de "bomba de calor desconectada", mientras que, en el segundo día un año después, el modo de funcionamiento es el de "bomba de calor conectada".

Para el primero, tal y como se ha descrito en el apartado 4.3.1 anterior, solo el circuito solar funciona cargando el tanque solar hasta un valor máximo. Para el segundo día, se toman condiciones ambientales que sean muy similares al caso sin carga, de esta forma se apreciará la respuesta del sistema cuando funciona bajo carga, analizando la respuesta de la fachada activa y de la bomba de calor.

Para el rendimiento de la fachada activa la comparación es directa contrastando la producción de la fachada activa, en términos de energía recogida por el panel, al comparar el caso acoplado y el desacoplado. Para el rendimiento de la bomba de calor, sin embargo, el COP medido en el

segundo día bajo condiciones de carga no se puede comparar con el primer día puesto que en ese caso no hay una bomba de calor contra la que se puedan referenciar los valores, ya que en la instalación experimental la bomba de calor está apagada durante esos días. Por tanto, los valores de COP que se calculan en el segundo día tomando como datos de partida la información que se ha monitorizado, serán comparados frente a valores teóricos de COP estimados para una instalación de bomba de calor independiente. Este día supondrá una referencia virtual frente a la que comparar el sistema combinado y se utilizarán también como entradas los datos experimentales para calcular la respuesta de las soluciones alternativas.

Por lo tanto, se considerarán dos tecnologías diferentes y comparables de acuerdo con los modelos simplificados en función del salto térmico según lo dispuesto por Staffell et al. [284] Cabe destacar a este respecto que esos valores teóricos son valores máximos y que cuando se consideran condiciones reales de servicio, los rendimientos son, en general, significativamente más bajos [284]. Esta situación es similar a la que se da con los colectores solares [285] [286], tal y como se ha comentado también en el capítulo III.

Las ecuaciones para estimar los COPs para soluciones geotérmicas (GSHP) y de aerotermia (ASHP) serán las representadas en las siguientes ecuaciones. Se trata de una versión simplificada para modelar ambas tecnologías considerando el salto térmico (ΔT) entre la fuente y la carga como el factor principal.

$$COP_{ASHP} = 6{,}81 - 0{,}121\,\Delta T + 0{,}000630\,\Delta T^2 \qquad \text{Para } 15 \leq \Delta T \leq 60 \qquad (41)$$

$$COP_{GSHP} = 8{,}77 - 0{,}15\,\Delta T + 0{,}000734\,\Delta T^2 \qquad \text{Para } 20 \leq \Delta T \leq 60 \qquad (42)$$

Por tanto, el análisis del rendimiento de la bomba de calor se plantea como una comparación entre los COPS calculados para el día real con el sistema acoplado y los estimados para las tecnologías equiparables. Concretamente se analizarán cinco parámetros principales:

- $COP_{MAX.}$ El valor máximo de COP calculado tomando en consideración únicamente la electricidad consumida por la bomba de calor. Ecuación (38).
- $COP_{FS}$. El valor asociado a la producción de la fachada activa acoplada al sistema, considerando la electricidad consumida por la bomba de calor y por el circuito solar. Se toman las ecuaciones (39) y (40) contemplando en la segunda $W_{aux} = W_{FS}$. Este parámetro es el más representativo para describir el caso de la fachada activa como la fuente que se acopla a la bomba de calor, de forma equiparable a otras tecnologías. Por tanto, este COP será la referencia principal para contrastar la respuesta del sistema combinado.
- $COP_{SYS}$. El valor de COP contemplando todos los consumos asociados al sistema. Además de los consumos eléctricos incluidos en los dos anteriores (bomba de calor y circuito solar) se consideran el resto de los componentes con un consumo significativo:
    - Las baterías de intercambio para la impulsión (SAM) y extracción del aire (FLM), para lo que se consideran las ecuaciones (39) y (40) siendo para la segunda

$$W_{aux} = W_{FS} + W_{SAM} + W_{FLM} \qquad (43)$$

En este caso, el COP es un factor representativo del sistema completo, por lo que puede considerarse también como un Factor Estacional de Rendimiento (SPF – Por sus siglas en inglés) diario que se caracteriza principalmente por el sistema de distribución del circuito de calefacción por aire, cuyas baterías incidirán directamente en el incremento del consumo eléctrico del conjunto.

- $COP_{ASHP}$. El valor de COP para una bomba de calor por aerotermia que trabaje con salto térmico como el registrado para el día de referencia. Ecuación (41).
- $COP_{GSHP}$. El valor de COP para una bomba de calor geotérmica que trabaje con salto térmico como le registrado para el día de referencia. Ecuación (42).

En el apartado 5.2.2 se describen las parejas de días que han sido seleccionados para plantear el análisis comparativo describiendo tanto las condiciones ambientales como de funcionamiento de cargas consideradas.

# 5. DETALLE DE LA CAMPAÑA EXPERIMENTAL

En los siguientes apartados se presentan los resultados que se han obtenido de la campaña experimental desarrollada entre marzo de 2017 y agosto de 2018, estudiando en primer lugar el circuito solar con la fachada activa a modo de colector y, a continuación, el sistema completo que combina el sistema activo a la bomba de calor.

Se van a presentar y describir, a continuación, las series de días que han resultado de la campaña experimental y que se van a emplear para el estudio, una vez se han depurado los datos de la monitorización.

## 5.1. Resultados experimentales del circuito solar con la fachada activa

La campaña experimental para el circuito solar cuenta con una serie de hasta de 146 días monitorizados principalmente en un periodo de 11 meses entre marzo 2017 y primeros días de 2018. De forma complementaria se cuenta también con datos adicionales correspondientes al verano de 2018, correspondientes a la última semana de julio y el mes de agosto completo.

| | $T_{amb}$ (°C) | Radiación diaria acumulada – $Q_{sol}$ - (kWh/m$^2$) | Producción diaria - $Q_u$ (kWh/m$^2$) | Rendimiento promedio - $\eta_{FA}$ (%) | Caudal - $\dot{m}$ (kg/s) |
|---|---|---|---|---|---|
| 10/03/2017 | 16,05 | 5,70 | 0,76 | 0,15 | 0,136 |
| 14/03/2017 | 12,33 | 2,02 | 0,33 | 0,22 | 0,121 |
| 08/04/2017 | 17,60 | 4,84 | 0,49 | 0,13 | 0,129 |
| 11/04/2017 | 14,08 | 3,39 | 0,25 | 0,10 | 0,124 |
| 24/05/2017 | 21,66 | 3,40 | 0,50 | 0,16 | 0,130 |
| 29/05/2017 | 17,50 | 1,53 | 0,20 | 0,18 | 0,130 |
| 21/06/2017 | 27,76 | 3,09 | 0,43 | 0,17 | 0,132 |
| 26/06/2017 | 20,92 | 2,15 | 0,38 | 0,22 | 0,125 |
| 16/07/2017 | 21,57 | 3,27 | 0,35 | 0,14 | 0,132 |
| 22/07/2017 | 18,16 | 2,42 | 0,35 | 0,17 | 0,132 |
| 17/08/2017 | 21,08 | 3,95 | 0,57 | 0,16 | 0,133 |
| 31/08/2017 | 17,16 | 1,61 | 0,05 | 0,07 | 0,131 |
| 13/09/2017 | 19,04 | 4,55 | 0,79 | 0,18 | 0,056 |
| 12/09/2017 | 17,23 | 2,81 | 0,44 | 0,16 | 0,090 |
| 03/10/2017 | 19,09 | 0,92 | 0,05 | 0,09 | 0,076 |
| 08/10/2017 | 13,72 | 5,69 | 0,59 | 0,13 | 0,079 |
| 21/11/2017 | 10,73 | 5,48 | 0,65 | 0,11 | 0,063 |
| 26/11/2017 | 7,79 | 2,20 | 0,31 | 0,22 | 0,059 |
| 06/12/2017 | 5,19 | 5,41 | 0,39 | 0,11 | 0,061 |
| 29/12/2017 | 12,74 | 1,85 | 0,20 | 0,11 | 0,061 |
| 08/01/2018 | 7,45 | 4,05 | 0,42 | 0,14 | 0,057 |
| 12/01/2018 | 8,22 | 1,56 | 0,15 | 0,14 | 0,053 |

**Tabla 33. Selección de días representativos monitorizados durante la campaña experimental para caracterizar la fachada solar en diferentes épocas del año funcionando de forma aislada.**

Las tres figuras siguientes (Figura 108, Figura 109 y Figura 110) muestran un total de veintidós días monitorizados entre 2017 y 2018 que permiten diferenciar, para cada mes, los extremos que se presentan entre días soleados con una alta productividad y radiación, frente a aquellos con escasa energía solar y que implican a su vez una respuesta más limitada del sistema.

Las gráficas representan la evolución de la potencia instantánea (expresada en $W/m^2$) para la radiación solar ($I_{sol}$) y producción útil obtenida de la fachada ($P_u$). La relación entre la energía incidente y la aprovechada vendrá determinará el rendimiento ($\eta_{FA}$). Los valores diarios acumulados respectivos serán la *Radiación diaria acumulada* ($Q_{sol}$) y la *Producción diaria* ($Q_u$).

La Tabla 33 presentada anteriormente resume las condiciones en cada uno de estos días para la temperatura ambiente ($T_{amb}$) y la radiación en fachada sur ($Q_{sol}$), así como la respuesta del sistema expresada a través de la energía producida ($Q_u$) y el rendimiento promedio diario ($\eta_{FA}$).

La producción diaria es la energía total acumulada ($Q_u$), para un período de un día completo, combinando el salto térmico con el caudal registrado en cada intervalo de tiempo medido (ecuación (7)). La radiación diaria es la energía acumulada ($Q_{sol}$) para cada día específico medida en la fachada sur.

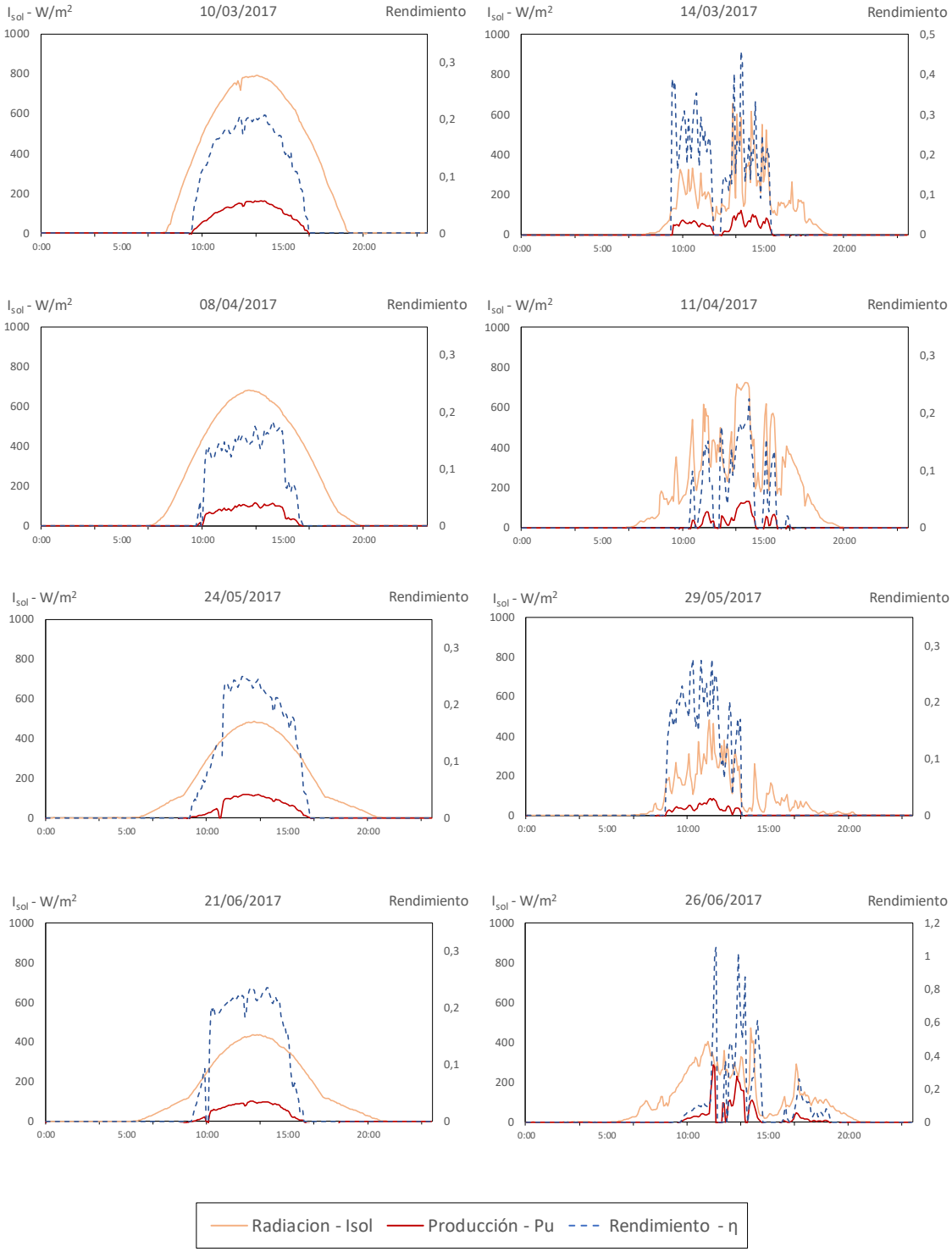



**Figura 108. Evolución del rendimiento del sistema de Fachada Activa y producción solar frente a la radiación incidente en 8 días diferentes entre *marzo y junio de 2017; primavera*. [Lado izquierdo]: Días soleados con alta radiación disponible y producción solar. [Lado derecho]: Días con escasa energía solar en los que se limita considerablemente la respuesta del sistema.**

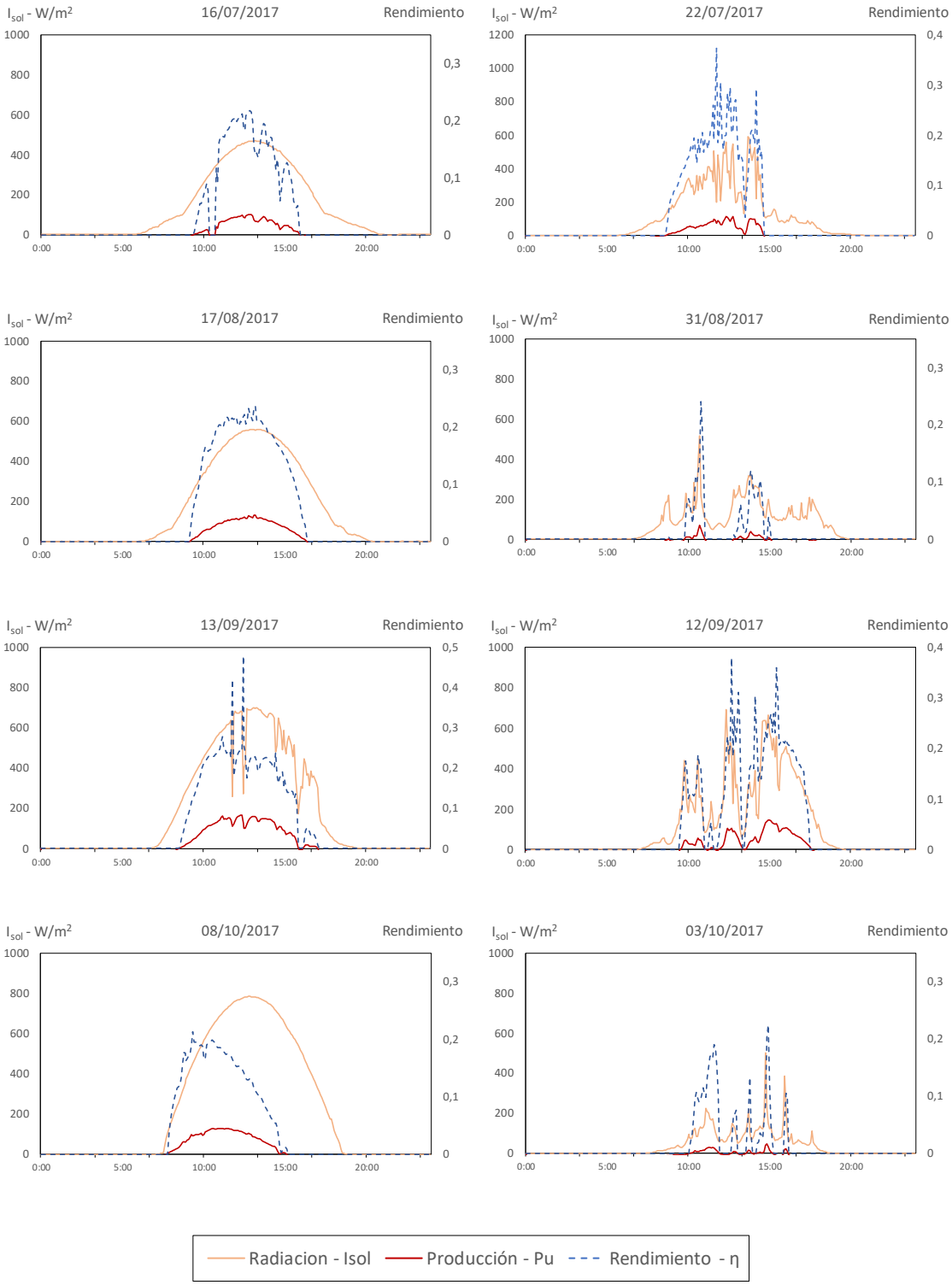



**Figura 109. Evolución del rendimiento del sistema de Fachada Activa y producción solar frente a la radiación incidente en 8 días diferentes entre *julio y octubre de 2017; verano*. [Lado izquierdo] Días soleados con alta radiación disponible y producción solar. [Lado derecho] Días con escasa energía solar en los que se limita considerablemente la respuesta del sistema.**

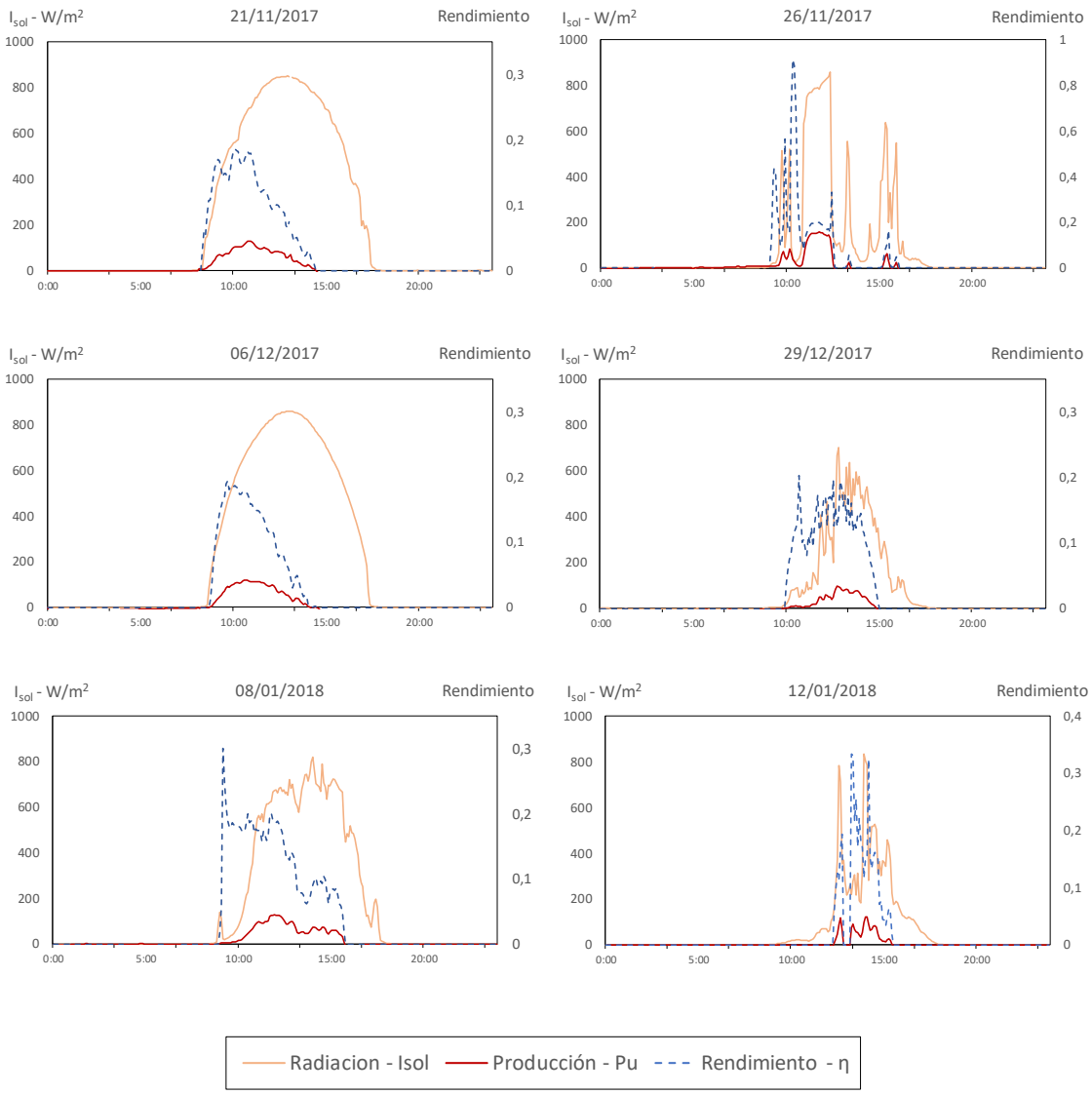



**Figura 110. Evolución del rendimiento del sistema de Fachada Activa y producción solar frente a la radiación incidente en 6 días diferentes entre *noviembre de 2017 y enero de 2018; invierno*. [Lado izquierdo] Días soleados con alta radiación disponible y producción solar. [Lado derecho] Días con escasa energía solar en los que se limita considerablemente la respuesta del sistema.**

Un análisis más extenso que contempla los 11 meses descritos en las figuras anteriores, junto con los meses de julio y agosto de 2018 tomando en consideración un total de 125 días, dio como resultado una producción diaria promedio de 306 Wh/m$^2$ y un rendimiento promedio 10,2%.

En la siguiente Figura 111 se puede apreciar la correlación que existe entre la cantidad de radiación disponible ($Q_{sol}$) y la producción solar del sistema activo de fachada ($Q_u$). A pesar de tratarse de días diferentes con condiciones de funcionamiento diversas en cuanto a temperatura ambiente, viento y caudal, la radiación solar destaca como el factor más influyente a la hora de establecer una correlación entre uno de estos factores y la producción asociada. Esto es consecuente con los resultados que se obtuvieron en las simulaciones del capítulo III.

Cabe destacar también que el número de paneles activos varía con el tiempo. La posibilidad de conectar o desconectar baterías de paneles en paralelo, permite variar la fachada solar desde un mínimo de superficie activa de 6 $m^2$ hasta un máximo de 18 $m^2$. Para analizar las diferencias que se dan entre estos dos extremos, en los primeros meses (enero-agosto 2017) se ha analizado el sistema con 6 $m^2$ de superficie activa, mientras que en el resto de los meses se han estudiado principalmente 18 $m^2$. La diferenciación al considerar la superficie activa de paneles y, la relación que también se establece con el caudal, se presentan a continuación en el apartado 5.1.1.

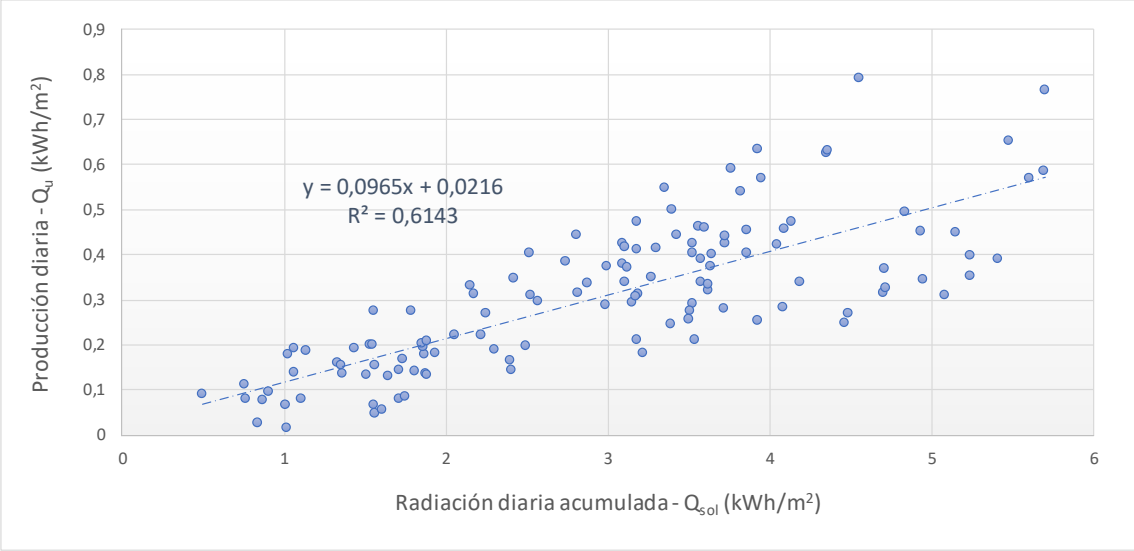



**Figura 111. Relación entre radiación ($Q_{sol}$) y producción del sistema de fachada activa ($Q_u$) para toda la campaña experimental monitorizada**

Si se analizan periodos más cortos de tiempo con condiciones más similares de funcionamiento y se agrupan en series de días, se obtienen correlaciones más precisas. A continuación (Figura 112), se muestra este caso para julio-agosto 2017, septiembre 2017, diciembre 2017 y agosto 2018, en donde se aprecia relación entre la producción y la radiación diaria.

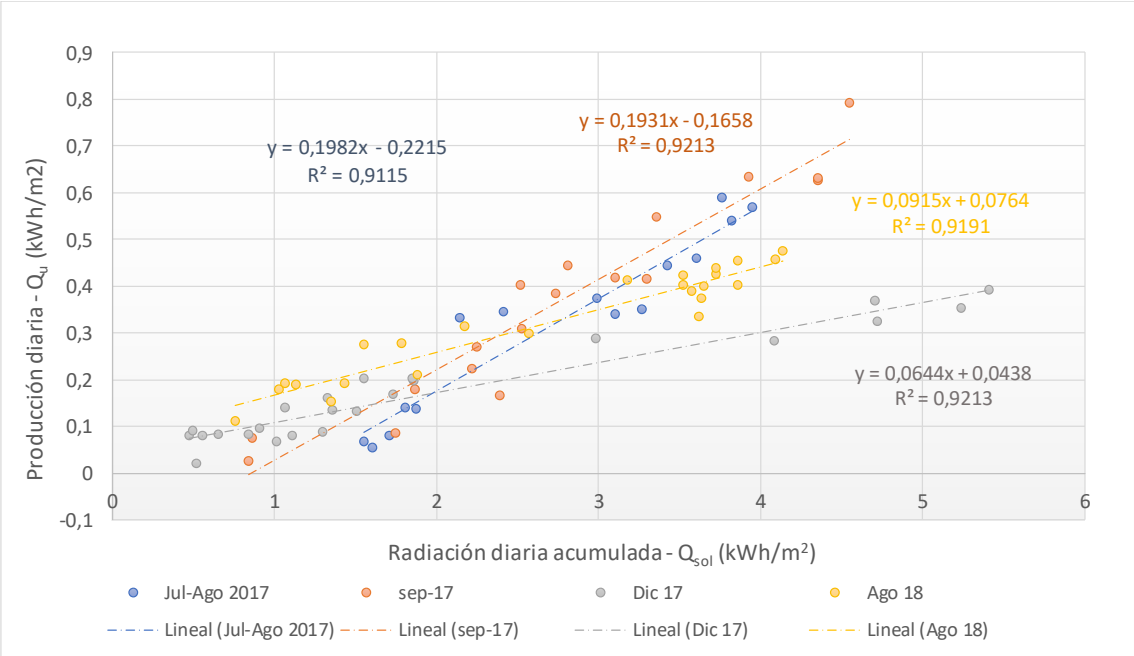



**Figura 112. Relación entre radiación ($Q_{sol}$) y producción del sistema de fachada activa ($Q_u$) agrupando días con condiciones ambientales y de funcionamiento similares**

Los aspectos destacables tras analizar esta primera campaña para la fachada desacoplada son:

- El panel recoge de media a un 10-12% de la radiación media promedio y en días concretos puede llegar hasta un valor del 24%.
- La forma de la curva implica que cuando la radiación es menor, generalmente se alcanzan rendimientos porcentualmente mayores, pero la producción neta y la energía aprovechada es menor. Es decir, en términos generales el rendimiento es mayor pero la producción es menor.
- Como era de esperar, la producción se da en todos los casos en el momento que hay alguna radiación y la curva de producción se encuentra en todo momento dentro de los límites de radiación solar.
- En términos generales la potencia máxima que se alcanza se encuentra cerca de los 160-180 W/m$^2$, aunque se aprecian picos puntuales superiores (hasta 270 W/m$^2$ el 26/06/2017). Esta potencia máxima está asociada al salto térmico y tal, y como se ha analizado en el capítulo III puede ser regulada con el caudal o la temperatura de impulsión, aunque estas modificaciones también tendrán efecto en el rendimiento.
- El rendimiento obtenido es menor que el que se ha empleado como referencia en el capítulo III (34%). El motivo principal de esta diferencia se debe a que el sistema real cuenta con la limitación del tanque de almacenamiento que se va saturando progresivamente hasta alcanzar su máxima capacidad, fenómeno que no se ha podido simular en el caso anterior.
- Por otro lado, la limitación de caudal de 0,13 kg/s, que se ha indicado también en el capítulo anterior, hace referencia al caso de 6m$^2$ de panel activo (1 batería en funcionamiento). Ese caudal es el mínimo que se obtiene para una batería conectada a la bomba de circulación y representa una limitación para el conjunto experimental, puesto que contar con caudales menores resulta de gran interés para el estudio. Pero cuando se utilizan otras dos baterías más en paralelo (18m$^2$ de superficie activa en total),

se consiguen caudales menores (de hasta 0,05 kg/s) debido a que con la misma capacidad de impulsión de la bomba se debe hacer frente a mayores pérdidas de carga en el circuito. De esta forma y, contemplando caudales diferentes, se puede apreciar en los datos experimentales la alta incidencia que el caudal tiene la respuesta del sistema [287].

- La producción diaria promedio calculada para el periodo monitorizado (de 306 kWh/m$^2$ día), implica una producción anual cercana al 30% del que se ha indicado en el capítulo I (Tabla 3) [283]: entre 300 y 350 kWh/m$^2$ anuales para los colectores solares no vidriados. Los motivos por los que se da esta producción significativamente menor son:
    - La menor radiación incidente en el plano de la fachada analizada (del orden de un 75% de la horizontal),
    - a que esta es una primera versión del prototipo del sistema activo con potencial de mejora (comentado en el capítulo III), pero,
    - fundamentalmente la reducción se debe al funcionamiento en modo aislado de la fachada, donde la energía recogida únicamente se almacena en el depósito y, por tanto, no implica una reducción del nivel térmico del depósito que permita aumentar la producción del panel. En este modo de funcionamiento aislado, se alcanza un punto de saturación en el que no se consigue superar un cierto nivel de producción diario. En el siguiente apartado 5.2 se va a profundizar en este aspecto, demostrando que se puede alcanzar una respuesta muy superior cuando se consume, en ciclos diarios, la energía obtenida por la fachada activa.

### 5.1.1. Consumo eléctrico asociado a la bomba de circulación del circuito solar

Un aspecto importante de este primer análisis es el consumo eléctrico asociado a la bomba de circulación del sistema solar.

Los datos que se han presentado anteriormente evidencian la energía térmica que se obtiene de la fachada activa, pero dicha producción tiene un coste eléctrico debido a la operación del sistema y a la energía requerida por la bomba para hacer circular el fluido por el circuito hidráulico de la fachada activa.

La Figura 113 muestra la relación que se da entre la electricidad consumida y la energía térmica obtenida por el conjunto de colectores solares integrados en la fachada, distinguiendo dos modos de funcionamiento diferentes:

- el primero con 6 m$^2$ de fachada activa y caudal medio de 0,130 kg/s, y
- el segundo con 18 m$^2$ de superficie y 0,078 kg/s.

Esta relación entre energías térmica y eléctrica representa una relación análoga al COP de la bomba de calor.

Tal y como se puede apreciar en la pendiente de la primera curva, una menor superficie implica un mayor rendimiento del colector y un mejor aprovechamiento de la electricidad transformándola en energía térmica. Pero a pesar de este mayor rendimiento por m$^2$ instalado, la cantidad de energía térmica en ese caso es más limitada que cuando se cuenta con más paneles activos (segunda curva), en donde se consigue una producción neta mayor, pero siendo tanto el aprovechamiento eléctrico como el rendimiento [288] del colector inferiores.

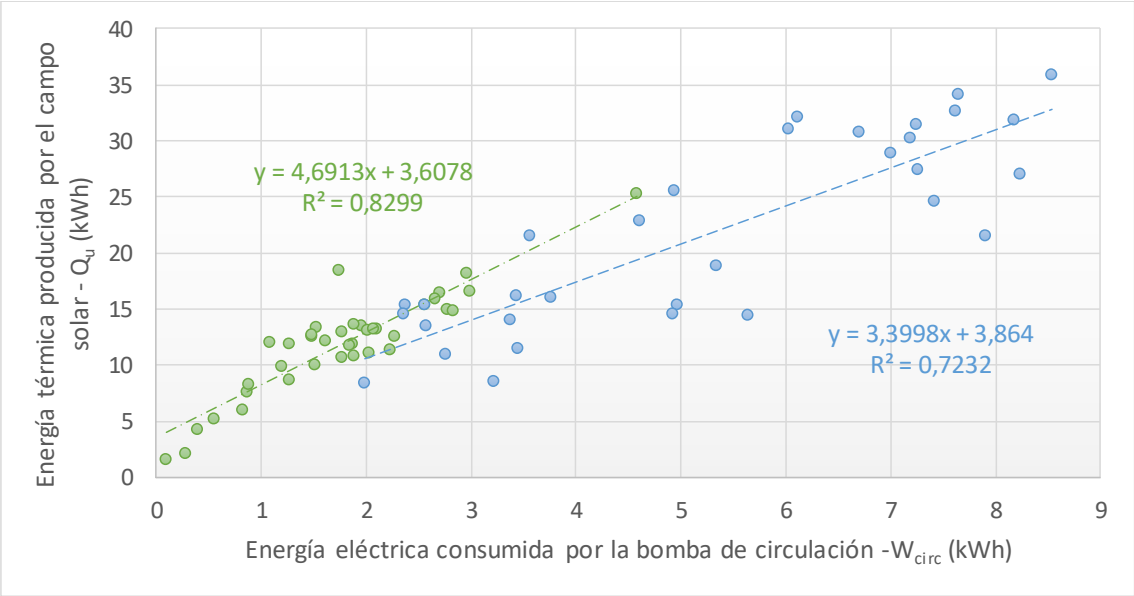



**Figura 113. Relación entre consumo de electricidad ($W_{circ}$) y energía térmica producida por la fachada solar activa ($Q_u$) cuando trabaja de forma desacoplada del resto del sistema, para 6m² (curva verde) y 18m² (curva azul) de fachada activa**

### 5.1.2. Influencia del depósito de almacenamiento para el circuito solar

Otro aspecto relevante que se debe valorar convenientemente es la influencia del tanque de almacenamiento solar. Este elemento es el que dota al sistema de cierta flexibilidad al desacoplar la producción solar durante el día de los periodos de consumo. Es decir, existen ciertos patrones en los que la producción y el consumo ocurren de forma acoplada en los mismos periodos del día y otros, en los que el consumo se da de forma desacoplada (como la producción de calefacción por la noche, por ejemplo), aunque en la mayoría de los casos se darán situaciones mixtas.

Asumiendo que prácticamente siempre se van a dar ciertos momentos de producción – consumo desacoplado, la contribución del depósito solar resulta un factor de diseño muy significativo.

Cuando no se puede lograr la correspondencia entre la producción solar y el aprovechamiento de esa energía, ya sea porque la producción se requiere durante la noche o porque hay un día nublado, el tamaño del tanque de almacenamiento y la forma de gestionarlo representa uno de los aspectos clave para la optimización del diseño de los sistemas que emplean energía solar.

Para ilustrar la relevancia, tanto del depósito como de su relación con la energía recogida por la fachada activa, se presenta a continuación un ejemplo comparativo de dos días funcionando en condiciones diferentes y en los que la energía acumulada en el depósito también presenta grandes diferencias a pesar de que el tamaño del depósito permanece invariable (285 L).

En la Figura 114 se presentan dos días separados por apenas dos semanas (13 y 27 de septiembre de 2017). En el primero se cuenta con 6m² de fachada activa y un caudal de 0,056 kg/s y en el segundo se triplica el área de colectores (hasta 18 m²) con un incremento leve del caudal hasta 0,060 kg/s.

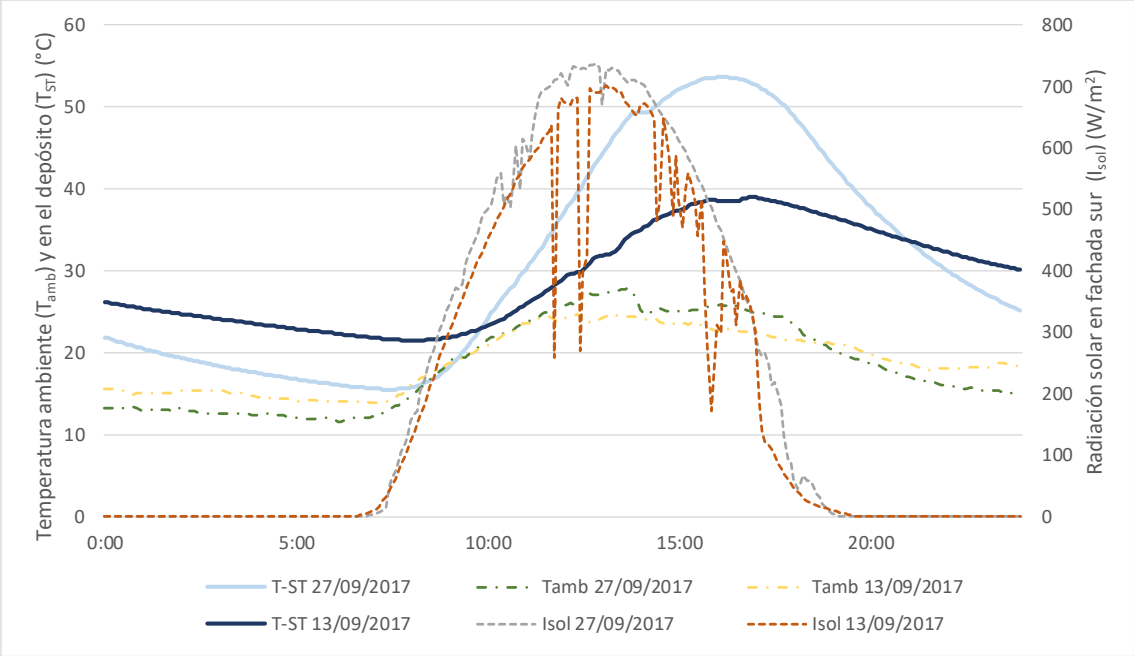



**Figura 114. Contraste de energía acumulada en el depósito solar ($T_{ST}$) para dos días con condiciones ambientales similares, pero siendo la superficie de fachada activa del segundo, (27 de septiembre), tres veces mayor que en el primero (13 de septiembre)**

Tal y como se puede apreciar para unas condiciones ambientales muy similares en cuanto a radiación ($I_{sol}$) y temperatura ambiente ($T_{amb}$), el salto térmico que se alcanza en el depósito el día 13 es de 17,41°C (pasando de 21,53°C a 38,94 °C) mientras que el día 27 se da una variación de 38,17°C (pasando de 15,51°C a 53,67°C).

El hecho de que la temperatura de partida sea inferior en el segundo día también contribuye a que el salto neto sea superior (2,19 veces mayor), siendo la energía producida por el sistema de la fachada solar proporcional a dicho salto térmico.

Es decir, el mismo depósito solar con la misma capacidad y para unas condiciones ambientales exteriores muy cercanas, consigue acumular, como era de esperar, más energía cuando se incrementa la capacidad de producción solar (triplicando la superficie activa de paneles). En ambos casos se constata que se da un valor máximo de acumulación de energía vinculado a la capacidad del depósito y al ciclo diario de producción de energía [289].

### 5.1.3. Principales conclusiones de la experimentación con la fachada activa funcionando de forma aislada

La producción solar obtenida en la campaña experimental resulta ser todavía modesta si se compara con otros sistemas de colectores solares. No obstante, cabe destacar los siguientes puntos:

- La energía obtenida ha sido evaluada para un elemento desacoplado y en un circuito cerrado.
  El ciclo diario ensayado únicamente permite evacuar el calor obtenido durante la noche y, al no existir un sumidero o carga de mayor potencia, la producción queda condicionada a este modo de funcionamiento.
- Cuando se acople una carga al circuito solar, tanto la producción como el rendimiento se incrementarán de forma sustanciosa, tal y como se va a describir en el siguiente apartado.
- Esta es la primera versión de un prototipo que cuenta todavía con margen de mejoraren cuanto a su diseño, tal y como lo demuestra el estudio paramétrico desarrollado en el capítulo III. Para la solución de panel, diseños alternativos en los que se sustituyen los conductos de plástico por metálicos, una reducción del tamaño del panel, o alterar las características del absorbedor supondrían una mejora clara.
- En la comparación hay que tener en cuenta también la disposición en el plano vertical de fachada por lo que la energía disponible será menor también.

Las ventajas principales asociadas a una solución de este tipo (fachada activa con colector no vidriado) son:

1. un menor coste y
2. condiciones de operación del colector más seguras y menos costosas a costa de renunciar a mayores energías en el colector.

Sin embargo, cuando se contempla el modo de funcionamiento con un sistema acoplado produciendo para una carga (descrito en el siguiente apartado 4), se comprende mejor el gran potencial que tienen estas soluciones con producciones significativamente muy superiores al caso desacoplado.

## 5.2. Resultados de los ensayos para el sistema combinado de circuito solar con fachada activa y bomba de calor. Análisis Comparativo

Para el caso del sistema combinado, la campaña experimental contempla 6 meses desde mediados de enero de 2018 hasta finales de julio del mismo año. En dicho periodo se cuenta con un total de 118 días monitorizados en los que se ha analizado el comportamiento de la fachada activa, de la bomba de calor y la relación que se establece entre ambos.

La descripción completa de la campaña experimental se realiza más adelante en la sección 5.2.2 del presente capítulo y el análisis comparativo se la primera sección 5.2.1, puesto que el ejercicio comparativo desarrollado permite comprender mejor el alcance de los resultados obtenidos.

### 5.2.1. Planteamiento del análisis comparativo

Para plantear el análisis comparativo, tal y como se ha descrito en el apartado 4.3.2, se seleccionan una serie de días de este periodo en el que el sistema trabaja de forma acoplada y se comparan con los datos proporcionados por los días de la campaña anterior, en la que el

sistema activo se encontraba desacoplado de la bomba de calor. Para ello, se buscarán en primer lugar días con unas condiciones ambientales similares en ambos periodos.

De forma ilustrativa, se presenta a continuación un ejemplo en el que se describe el proceso de identificación para dos días equiparables.

Cuando se analizan los datos recopilados durante las experimentaciones de 2017 y 2018 respectivamente, se puede apreciar un patrón bastante similar entre el 17 de junio de 2017 (temperatura ambiente media ($T_{amb}$) de 21,18 °C y radiación acumulada ($Q_{sol}$) de 3,178 kWh/m$^2$) y el 26 Junio de 2018 (temperatura ambiente promedio ($T_{amb}$) de 20,57 °C y radiación acumulada ($Q_{sol}$) de 3,137 kWh/m$^2$).

Se trata básicamente de dos días despejados en la misma época del año separados por un año de diferencia. La Figura 115 (izquierda) representa la evolución de la temperatura ambiente y la radiación solar en la fachada vertical sur para ambos días.

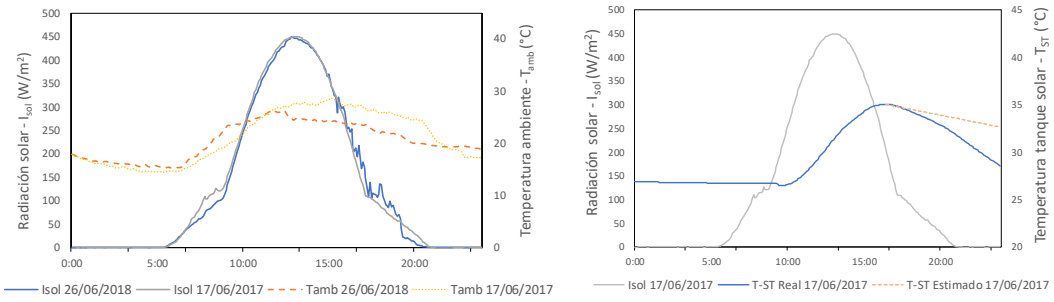



**Figura 115. Comparación de las condiciones ambientales para los dos días considerados (izquierda) y evolución de la temperatura en el tanque de almacenamiento solar ($T_{ST}$) durante el día 17/06/2017 (enfriamiento real y estimado después del valor máximo). [260]**

El día de 2017 (**Día 1**), se desarrolló con un funcionamiento en modo "bomba de calor desconectada", mientras que el otro en 2018 (Día 2), discurrió con el modo de "bomba de calor conectada".

En el primer día el tanque de almacenamiento solar se va calentando hasta alcanzar el valor máximo de carga y, puesto que no hay una carga acoplada al mismo, el depósito mantendrá el calor en el interior hasta que se utilice, se disipe o, en caso de tener dicha posibilidad, se cargue todavía más al día siguiente.

La Figura 115 (derecha) muestra este caso para el día 1, donde el valor máximo de la temperatura surge unas pocas horas después del pico máximo de radiación máxima debido a la inercia del conjunto.

Después de ese punto máximo de temperatura, se puede apreciar un efecto de enfriamiento en el tanque debido al funcionamiento continuo de la bomba de circulación para disipar el calor al aire durante la noche y permitir así ciclos adicionales en días sucesivos.

Este proceso de enfriamiento se puede considerar como una pequeña carga térmica, a pesar de tener una limitación evidente en cuanto a la capacidad para consumir la energía contenida en el tanque. Por otro lado, si dicha operación no se hubiera producido, la

energía térmica podría haber sido almacenada para ser empleada en otro momento más adecuado.

En la Figura 115 (derecha) se representa la estimación realizada en la evolución de la temperatura del tanque en la hipótesis de desconexión del sistema activo (línea discontinua), asumiendo que la bomba de circulación se desconecta cuando se alcanza el punto máximo y que, por tanto, la reducción de la temperatura se debe únicamente a las pérdidas del tanque.

Para el caso del ***Día 2***, funcionando bajo carga, existe un patrón de consumo de ACS asociado a la descarga del tanque de ACS en ciertos momentos del día (8 en total para este día).

Esta energía empleada para el consumo de ACS (33,27 kWh de energía térmica útil), implicará a su vez una producción de agua caliente por parte de la bomba de calor proporcionando calor para recargar el tanque de ACS cada vez que se produzca el consumo y la temperatura de este baje del valor de consigna.

Por otro lado, la bomba de calor absorberá el calor del tanque solar a través de su conexión con este otro depósito por el lado de la fuente.

La Figura 116 representa los perfiles de temperatura en ambos depósitos (el tanque solar y el tanque de ACS), así como la energía térmica útil acumulada y proporcionada por el sistema para consumo de ACS.

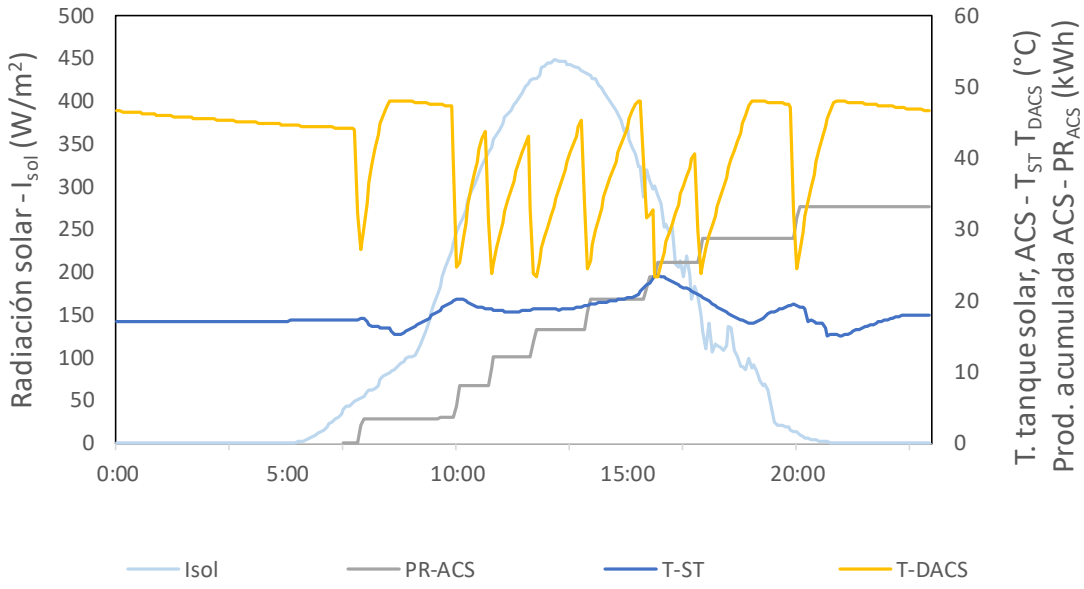



**Figura 116. Evolución de las temperaturas en el tanque de almacenamiento solar ($T_{ST}$) y el tanque de ACS ($T_{DACS}$) y la producción de energía útil para consumo de ACS acumulada en el *Día 2*. [260]**

El análisis comparativo se realiza tanto para el panel activo como para la bomba de calor.

Para analizar el panel, se establece una comparación directa entre el día con la bomba desacoplada frente al día con la bomba acoplada. Los términos de comparación serán la producción solar total (ecuación (7)) y el rendimiento del panel (ecuación (6)), tal y como se ha descrito en el apartado 4.3.1 de este capítulo.

Para analizar la bomba de calor, los términos de comparación principales serán los diferentes COPs que se calcularán para el día del sistema acoplado (ecuaciones (38), (39) y (40)), así como los que se deben estimar para sistemas de bombas de calor alternativos (ecuaciones (41) y (42)), tal y como se ha descrito en el apartado 4.3.2.

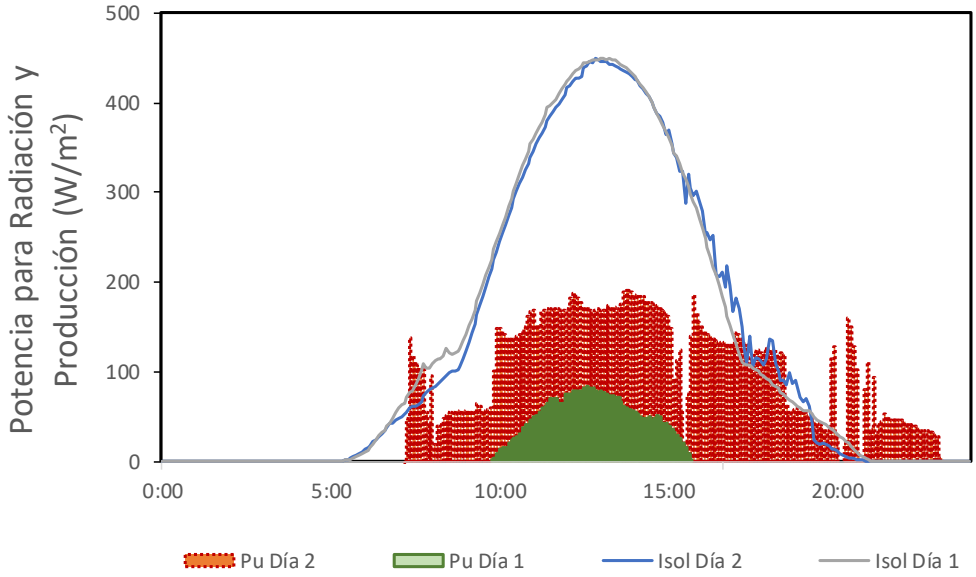



**Figura 117. Evolución de los datos monitorizados para la radiación y producción solar de la fachada activa durante los *Días 1 y 2*. [260]**

La diferencia en el rendimiento que se obtiene de la fachada solar durante estos dos días similares es la que se representa en la Figura 117, donde se describe la energía obtenida por la fachada solar en cada día, contrastando un día sin carga (Día 1) frente a otro día en el que la bomba de calor está produciendo agua caliente para consumo de ACS (Día 2).

Tal y como se ha aprecia en la Tabla 34, para prácticamente la misma cantidad de radiación disponible, el colector acoplado a la bomba de calor recoge, 5,6 veces más energía en comparación con el caso sin carga.

Por lo tanto, el rendimiento del colector sigue la misma tendencia (5,5 veces mayor). La energía específica extraída a través de la fachada activa para cada uno de los escenarios, así como los rendimientos son los recogidos en la Tabla 34.

| | Día 1 | Día 2 |
|---|---|---|
| Temperatura ambiente media ($T_{amb}$) (°C) | 21,18 | 20,57 |
| Radiación acumulada ($Q_{sol}$) (kWh/m$^2$) | 3,178 | 3,137 |
| Energía recogida por el colector ($Q_u$) (kWh/m$^2$) | 0,307 | 1,722 |
| Rendimiento de la fachada activa ($\eta_{FA}$) (%) | 0,10 | 0,55 |

**Tabla 34. Comparativa entre los datos experimentales obtenidos para el rendimiento y producción de la fachada activa**

Para la bomba de calor, la Tabla 35 muestra los valores de COP calculados para el sistema acoplado durante el día 2 así como los estimados para una solución geotérmica y otra con tecnología aerotérmica.

Tal y como se puede apreciar, el sistema de bomba de calor asistido por la fachada solar se encuentra entre las dos tecnologías consideradas, siendo el $COP_{MAX}$ algo inferior al del caso geotérmico, pero bastante superior al ofrecido por la aerotermia. No obstante, merece la pena destacar de nuevo que, de acuerdo con la literatura, los valores calculados son en general, inferiores a los valores estimados mediante modelos simplificados como el considerado.

| | COP |
|---|---|
| $COP_{MAX}$ calculado del sistema combinado durante el día 2 | 4,76 |
| $COP_{FS}$ calculado del sistema combinado durante el día 2 | 4,53 |
| $COP_{SYS}$ calculado del sistema combinado durante el día 2 | 3,99 |
| $COP_{GSHP}$ estimado para el sistema Geotérmico | 5,18 |
| $COP_{ASHP}$ estimado para el sistema de Aerotermia | 3,94 |

**Tabla 35. Valores de COP calculados y estimados según los datos monitorizados durante el *Dia 2*. [260]**

El balance energético global para este Día 2, en junio de 2018, supone una producción total para consumo de ACS de 33,27 kWh, siendo de 36,5 kWh la producción neta de la bomba de calor, por lo que algo menos del 9% de la energía producida se pierde durante los procesos de distribución y almacenamiento del agua caliente.

Por otro lado, los consumos eléctricos que se dan son 7,69 kWh para la bomba de calor y 1,24 kWh para los componentes auxiliares, dividido en 0,35 kWh para la bomba de circulación del circuito solar y 0,89 kWh para los módulos de impulsión y extracción de aire.

Este caso representa, en términos generales, un escenario favorable, tanto porque se cuenta con una radiación y temperatura ambiente elevadas, puesto que se trata de un día en verano, como porque se cuenta con una producción intensiva asociada a la carga del sistema de ACS. Esto implica un total de 14 horas de trabajo para la bomba de calor entre las 7:10 a.m. y las 9:10 p.m., donde la radiación disponible y los periodos de producción de calor coinciden, en un horario representativo de un uso residencial.

### 5.2.2. Selección de días comparables y resultados del análisis comparativo

No obstante, y, más allá del caso presentado en el apartado anterior, resulta de interés contemplar escenarios en los que las condiciones de funcionamiento no sean tan favorables. Con el fin de considerar la contribución de la fachada solar, lo ideal sería repetir el ejercicio durante otras épocas del año y con condiciones ambientales alternativas, así como con diferentes cargas asociadas.

Sin embargo y, frente al caso planteado a modo de ejemplo en el apartado previo, en el que los días eran prácticamente iguales en términos de radiación y con alguna diferencia en la

temperatura ambiente, al analizar los datos disponibles para la serie completa registrada, resulta que se dan ciertas limitaciones a la hora de identificar parejas de días que puedan considerarse equiparables y que sirvan para el análisis comparativo.

Como consecuencia de esto, se adoptarán estos dos factores, radiación y temperatura, como aquellos que deben de guardar cierta similitud para que dos días puedan considerarse comparables.

En este caso, se han analizado las posibilidades de acuerdo con la información registrada y, tras valorar alternativas, se ha conseguido plantear un análisis comparativo bastante extenso obteniendo un total de 36 parejas de días comparables.

La Tabla 36 presenta los resultados obtenidos para los comparativos planteados con el fin de analizar el cambio en el rendimiento del colector cuando este se encuentra desacoplado (Día 1) frente a cuando trabaja bajo carga y acoplado a la bomba de calor (Día 2).

De forma complementaria, la Tabla 37 describe las condiciones de la carga y los diferentes COPs calculados y estimados para los días en los que el sistema trabaja de forma acoplada (Día 2). En este caso, se ha incluido además el parámetro de la fracción solar que compara la cantidad de energía que ha proporcionado el sistema solar, frente a la energía útil que la bomba de calor ha suministrado a las cargas.

En este estudio más extenso la Tabla 36 equivale a la Tabla 34 del ejemplo en el que, en primer término se contrasta el rendimiento de la fachada en el modo acoplado frente al desacoplado destacando el incremento que se aprecia cuando la fachada funciona combinada con la bomba de calor. De forma análoga al ejemplo descrito en la sección 5.2.1, la Tabla 37 es similar a la Tabla 35 del en el que se compara el COP calculado para el día 2, frente a los valores de COP estimados para los otros sistemas de bombas de calor equiparables.

Al igual que en el ejemplo que se ha presentado, los criterios principales para considerar dos días como equiparables han sido la radiación disponible y la temperatura ambiente, puesto que, de los parámetros ambientales, estos dos son los que mayor impacto tienen tanto en la producción como el rendimiento del colector.

Dado que resulta complicado combinar días en los que las dos variables sean muy similares a la vez, se ha adoptado la radiación como factor principal y la temperatura ambiente como secundario.

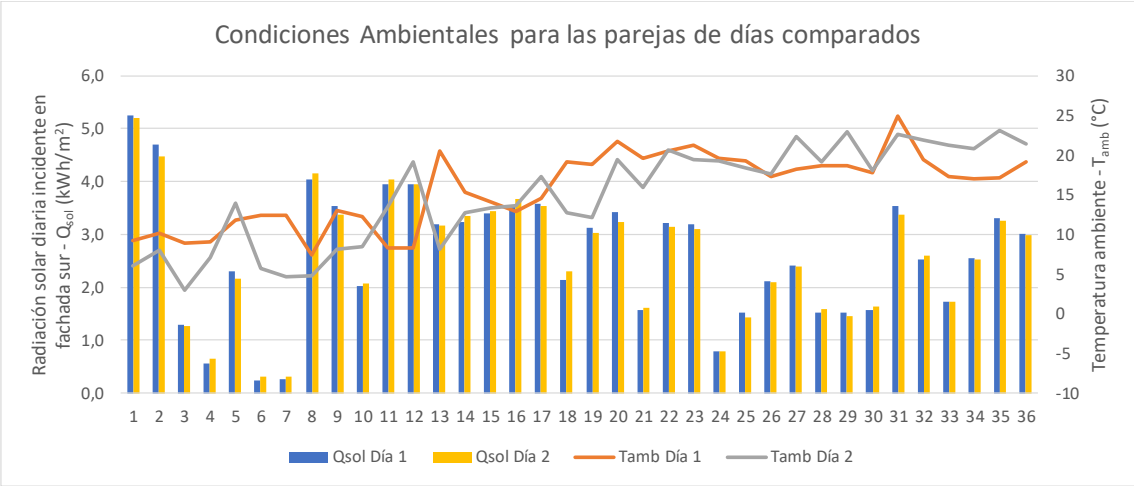



**Figura 118. Condiciones ambientales de las parejas de días comparadas recogidas en la Tabla 36, comparando radiación solar acumulada y temperatura ambiente media para los *Días 1 y 2*.**

Tal y como se aprecia en la Figura 118, la radiación disponible en las parejas de días es muy similar, pero la temperatura ambiente fluctúa. De esta forma, en lo que a la diferencia de temperaturas se refiere y, tomando en consideración la fecha del primer día (desacoplado), las temperaturas de estos días (Día 1 – fachada desacoplada) son en general superiores en el primer tercio (entre diciembre y marzo), situación que se invierte en los meses de abril y mayo siendo la temperatura de los Días 2 (sistema acoplado) mayor. Por otro lado, se da una situación bastante pareja entre junio, julio y principios de agosto y en los últimos días de agosto, de nuevo son los días 1 los que cuentan en general con temperaturas mayores.

Es importante resaltar que las 36 parejas de días presentadas en este caso no implican una descripción representativa de las condiciones de un año completo, aunque sí que cubren los extremos que se dan entre invierno y verano, así como un número considerable de días de primavera.

En este caso, a pesar de que idealmente sería conveniente cubrir al máximo unas condiciones que puedan representar un caso completo, la selección de días ha quedado limitada a las posibilidades de obtener días comparables funcionando en modo acoplado y desacoplado.

Para tener una información más extensa del caso desacoplado, la información presentada en el apartado 5.1 describe un total de 146 días entre marzo de 2017 y enero de 2018. De forma equivalente, para el caso del sistema acoplado se presentan más adelante (apartado 5.2.3) resultados del comportamiento de los 118 días monitorizados entre enero y julio de 2018.

A pesar de que esta información sigue suponiendo una limitación debido a las condiciones particulares que se han dado en estas dos campañas, en cuanto a condiciones ambientales y modos de funcionamiento y sin que pueda considerarse las condiciones que describen un “año estándar”, la información obtenida sí que permite comprender y caracterizar en gran medida y, con mayor fiabilidad, la forma en la que se comporta la fachada activa de forma independiente y el sistema combinando la fachada con una bomba de calor.

| Pareja nº | Día 1 | | | | | | Día 2 | | | | | | Comparativo | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Fecha | $Q_{sol}$ Día 1 (kWh/m²) | $T_{amb}$ Día 1 (°C) | ṁ Día 1 (kg/s) | $Q_u$ Día 1 (kWh/m²) | $\eta_{FA}$ Día 1 (%) | Fecha | $Q_{sol}$ Día 2 (kWh/m²) | $T_{amb}$ Día 2 (°C) | ṁ Día 2 (kg/s) | $Q_u$ Día 2 (kWh/m²) | $\eta_{FA}$ Día 2 (%) | Varia. Prod. ($Q_u$ Día2 / $Q_u$ Día1) | Varia. Rend. ($\eta_{FA}$ Día2 / $\eta_{FA}$ Día1) |
| 1 | 24-dic-17 | 5,24 | 9,24 | 0,062 | 0,35 | 6,75% | 28-ene-18 | 5,210 | 6,002 | 0,062 | 0,434 | 8,33% | 1,2 | 1,2 |
| 2 | 25-dic-17 | 4,71 | 10,14 | 0,061 | 0,33 | 7,00% | 31-ene-18 | 4,466 | 8,066 | 0,061 | 0,813 | 18,19% | 2,5 | 2,6 |
| 3 | 27-dic-17 | 1,30 | 8,85 | 0,059 | 0,09 | 6,69% | 07-feb-18 | 1,282 | 2,958 | 0,051 | 0,258 | 20,15% | 3,0 | 3,0 |
| 4 | 28-dic-17 | 0,56 | 9,08 | 0,060 | 0,08 | 14,40% | 01-feb-18 | 0,666 | 7,034 | 0,057 | 0,507 | 76,18% | 6,3 | 5,3 |
| 5 | 01-ene-18 | 2,31 | 11,79 | 0,058 | 0,19 | 8,12% | 16-feb-18 | 2,173 | 13,918 | 0,057 | 0,638 | 29,37% | 3,4 | 3,6 |
| 6 | 02-ene-18 | 0,25 | 12,46 | 0,058 | 0,02 | 6,17% | 05-feb-18 | 0,317 | 5,647 | 0,058 | 0,303 | 95,60% | 19,6 | 15,5 |
| 7 | 05-ene-18 | 0,26 | 12,38 | 0,058 | 0,00 | 0,51% | 09-feb-18 | 0,310 | 4,670 | 0,058 | 0,267 | 86,34% | 202,4 | 168,2 |
| 8 | 08-ene-18 | 4,05 | 7,45 | 0,057 | 0,42 | 10,33% | 26-feb-18 | 4,153 | 4,753 | 0,059 | 0,790 | 19,03% | 1,9 | 1,8 |
| 9 | 02-mar-17 | 3,54 | 13,07 | 0,131 | 0,29 | 8,18% | 21-feb-18 | 3,376 | 8,196 | 0,057 | 0,405 | 11,98% | 1,4 | 1,5 |
| 10 | 14-mar-17 | 2,03 | 12,33 | 0,121 | 0,33 | 16,07% | 17-mar-18 | 2,061 | 8,398 | 0,058 | 0,638 | 30,97% | 2,0 | 1,9 |
| 11 | 24-mar-17 | 3,94 | 8,25 | 0,132 | 0,25 | 6,45% | 04-mar-18 | 4,042 | 13,519 | 0,060 | 1,044 | 25,84% | 4,1 | 4,0 |
| 12 | 24-mar-17 | 3,94 | 8,25 | 0,132 | 0,25 | 6,45% | 22-abr-18 | 3,956 | 19,061 | 0,049 | 1,546 | 39,08% | 6,1 | 6,1 |
| 13 | 30-mar-17 | 3,18 | 20,45 | 0,133 | 0,30 | 9,28% | 22-mar-18 | 3,164 | 8,123 | 0,060 | 0,833 | 26,31% | 2,8 | 2,8 |
| 14 | 31-mar-17 | 3,23 | 15,27 | 0,113 | 0,18 | 5,62% | 23-mar-18 | 3,343 | 12,649 | 0,060 | 0,584 | 17,48% | 3,2 | 3,1 |
| 15 | 11-abr-17 | 3,40 | 14,08 | 0,124 | 0,25 | 7,25% | 16-abr-18 | 3,448 | 13,377 | 0,048 | 0,959 | 27,80% | 3,9 | 3,8 |
| 16 | 16-abr-17 | 3,55 | 12,88 | 0,124 | 0,21 | 5,94% | 14-abr-18 | 3,674 | 13,607 | 0,049 | 0,973 | 26,48% | 4,6 | 4,5 |
| 17 | 08-may-17 | 3,57 | 14,59 | 0,132 | 0,46 | 12,93% | 22-may-18 | 3,541 | 17,289 | 0,070 | 1,702 | 48,06% | 3,7 | 3,7 |
| 18 | 11-may-17 | 2,14 | 19,06 | 0,126 | 0,09 | 4,34% | 14-may-18 | 2,296 | 12,754 | 0,070 | 1,761 | 76,70% | 18,9 | 17,7 |
| 19 | 14-may-17 | 3,11 | 18,79 | 0,130 | 0,15 | 4,77% | 13-may-18 | 3,036 | 12,158 | 0,070 | 1,684 | 55,47% | 11,4 | 11,6 |
| 20 | 24-may-17 | 3,41 | 21,69 | 0,130 | 0,50 | 14,61% | 24-may-18 | 3,247 | 19,436 | 0,071 | 1,679 | 51,70% | 3,4 | 3,5 |
| 21 | 28-may-17 | 1,56 | 19,62 | 0,132 | 0,05 | 2,94% | 17-may-18 | 1,625 | 15,912 | 0,069 | 1,487 | 91,49% | 32,3 | 31,1 |
| 22 | 10-jun-17 | 3,20 | 20,42 | 1,298 | 0,31 | 9,70% | 26-jun-18 | 3,148 | 20,582 | 0,070 | 1,728 | 54,90% | 5,6 | 5,7 |
| 23 | 17-jun-17 | 3,19 | 21,19 | 0,132 | 0,31 | 9,64% | 23-jun-18 | 3,095 | 19,479 | 0,070 | 1,592 | 51,42% | 5,2 | 5,3 |
| 24 | 23-jun-17 | 0,79 | 19,53 | 0,122 | 0,00 | 0,00% | 27-jun-18 | 0,784 | 19,219 | 0,070 | 1,190 | 151,82% | 51015,0 | 51138,6 |
| 25 | 25-jun-17 | 1,51 | 19,21 | 0,127 | 0,04 | 2,43% | 19-jun-18 | 1,434 | 18,370 | 0,070 | 1,659 | 115,74% | 45,1 | 47,6 |
| 26 | 02-jul-17 | 2,12 | 17,27 | 0,131 | 0,23 | 10,79% | 16-jun-18 | 2,089 | 17,598 | 0,069 | 1,652 | 79,05% | 7,2 | 7,3 |
| 27 | 22-jul-17 | 2,43 | 18,17 | 0,132 | 0,35 | 14,25% | 01-jul-18 | 2,387 | 22,299 | 0,071 | 1,942 | 81,36% | 5,6 | 5,7 |
| 28 | 24-jul-17 | 1,53 | 18,64 | 0,132 | 0,03 | 1,80% | 05-jul-18 | 1,593 | 19,048 | 0,071 | 1,833 | 115,05% | 66,5 | 63,7 |
| 29 | 24-jul-17 | 1,53 | 18,64 | 0,132 | 0,03 | 1,80% | 25-jul-18 | 1,457 | 22,883 | 0,082 | 0,805 | 55,28% | 29,2 | 30,6 |
| 30 | 25-jul-17 | 1,56 | 17,81 | 0,132 | 0,07 | 4,23% | 10-jun-18 | 1,637 | 18,114 | 0,071 | 1,716 | 104,79% | 26,0 | 24,7 |
| 31 | 04-ago-17 | 3,53 | 24,97 | 0,133 | 0,43 | 12,13% | 23-jul-18 | 3,364 | 22,614 | 0,075 | 2,367 | 70,37% | 5,5 | 5,8 |
| 32 | 06-ago-17 | 2,53 | 19,45 | 0,132 | 0,25 | 9,91% | 02-jul-18 | 2,597 | 21,852 | 0,071 | 2,008 | 77,33% | 8,0 | 7,8 |
| 33 | 08-ago-17 | 1,72 | 17,35 | 1,316 | 0,08 | 4,55% | 12-jul-18 | 1,724 | 21,243 | 0,072 | 2,326 | 134,96% | 29,7 | 29,6 |
| 34 | 09-ago-17 | 2,55 | 16,99 | 0,132 | 0,16 | 6,44% | 17-jul-18 | 2,526 | 20,803 | 0,058 | 1,619 | 64,10% | 9,9 | 10,0 |
| 35 | 11-ago-17 | 3,32 | 17,10 | 0,132 | 0,42 | 12,57% | 10-jul-18 | 3,250 | 23,072 | 0,073 | 2,402 | 73,91% | 5,8 | 5,9 |
| 36 | 13-ago-17 | 3,00 | 19,18 | 0,132 | 0,37 | 12,43% | 13-jul-18 | 2,981 | 21,331 | 0,079 | 1,854 | 62,19% | 5,0 | 5,0 |
| | **Promedio Día 1** | **2,657** | **15,662** | **0,179** | **0,219** | **8,25%** | **Promedio Día 2** | **2,633** | **15,002** | **0,063** | **1,285** | **48,81%** | **5,9** | **5,9** |

**Tabla 36. Valores monitorizados de la fachada activa (producción solar y rendimiento) para los 36 pares de días seleccionados. Contraste del funcionamiento de la fachada desacoplada (*Día 1*) y acoplada a la bomba de calor (*Día 2*)**

| Pareja nº | Día 2 | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Fecha | Energía útil de la HP a la Carga, ACS - $Q_{HPACS}$ (kWh) | Energía útil de la HP a la Carga, Calefacción - $Q_{HPCAL}$ (kWh) | Fracción Solar (%) | $COP_{MAX}$ | $COP_{FS}$ | $COP_{SYS}$ | $COP_{GSHP}$ | $COP_{ASHP}$ |
| 1 | 28-ene-18 | 17,9 | 0,0 | 43,53% | 5,05 | 4,80 | 3,06 | ND | ND |
| 2 | 31-ene-18 | 25,5 | 0,0 | 57,36% | ND | ND | ND | ND | ND |
| 3 | 07-feb-18 | 4,6 | 17,1 | 21,41% | 3,70 | 3,65 | 1,80 | 5,20 | 3,96 |
| 4 | 01-feb-18 | 22,0 | 0,0 | 41,50% | 5,61 | 5,36 | 2,30 | 5,37 | 4,10 |
| 5 | 16-feb-18 | 19,1 | 0,0 | 60,15% | 4,03 | 3,88 | 2,84 | 5,00 | 3,80 |
| 6 | 05-feb-18 | 0,0 | 29,4 | 18,58% | 3,93 | 3,85 | 1,80 | 5,30 | 4,04 |
| 7 | 09-feb-18 | 0,0 | 37,0 | 13,03% | 3,80 | 3,74 | 1,84 | 5,03 | 3,82 |
| 8 | 26-feb-18 | 24,2 | 0,0 | 58,79% | 5,02 | 4,79 | 3,23 | 5,76 | 4,40 |
| 9 | 21-feb-18 | 13,1 | 13,2 | 27,69% | 4,12 | 4,05 | 2,09 | 5,24 | 3,99 |
| 10 | 17-mar-18 | 24,0 | 0,0 | 47,86% | 3,67 | 3,57 | 2,39 | 4,66 | 3,53 |
| 11 | 04-mar-18 | 28,1 | 0,0 | 66,91% | 4,47 | 4,34 | 3,44 | 5,22 | 3,97 |
| 12 | 22-abr-18 | 47,0 | 0,0 | 59,21% | 5,68 | 5,49 | 4,38 | 5,72 | 4,37 |
| 13 | 22-mar-18 | 19,2 | 0,0 | 78,06% | 3,68 | 3,54 | 2,47 | 4,76 | 3,62 |
| 14 | 23-mar-18 | 17,4 | 13,6 | 33,93% | 4,36 | 4,23 | 2,29 | 5,68 | 4,34 |
| 15 | 16-abr-18 | 25,3 | 0,0 | 68,20% | 4,29 | 4,16 | 3,25 | 5,21 | 3,96 |
| 16 | 14-abr-18 | 24,5 | 0,0 | 71,48% | 4,63 | 4,49 | 3,63 | 5,42 | 4,13 |
| 17 | 22-may-18 | 47,0 | 0,0 | 59,21% | 5,68 | 5,49 | 4,38 | 5,72 | 4,37 |
| 18 | 14-may-18 | 39,9 | 0,0 | 76,77% | 4,55 | 4,38 | 3,72 | 5,08 | 3,87 |
| 19 | 13-may-18 | 48,6 | 0,0 | 65,22% | 3,81 | 3,66 | 2,72 | 4,51 | 3,42 |
| 20 | 24-may-18 | 46,8 | 0,0 | 64,77% | 4,38 | 4,20 | 2,94 | 4,87 | 3,70 |
| 21 | 17-may-18 | 39,3 | 0,0 | 76,88% | 4,53 | 4,34 | 3,67 | 5,07 | 3,85 |
| 22 | 26-jun-18 | 40,2 | 0,0 | 66,57% | 3,93 | 3,73 | 2,73 | 4,67 | 3,54 |
| 23 | 23-jun-18 | 36,4 | 0,0 | 85,46% | 4,74 | 4,54 | 3,99 | 5,18 | 3,94 |
| 24 | 27-jun-18 | 36,2 | 0,0 | 79,14% | 4,74 | 4,56 | 4,06 | 5,11 | 3,89 |
| 25 | 19-jun-18 | 26,4 | 0,0 | 81,15% | 4,28 | 4,08 | 3,14 | 4,84 | 3,67 |
| 26 | 16-jun-18 | 40,7 | 0,0 | 73,38% | 4,01 | 3,86 | 3,10 | 4,70 | 3,57 |
| 27 | 01-jul-18 | 40,1 | 0,0 | 74,14% | 4,16 | 4,00 | 3,19 | 4,88 | 3,71 |
| 28 | 05-jul-18 | 45,0 | 0,0 | 77,69% | 4,75 | 4,56 | 3,90 | 5,15 | 3,92 |
| 29 | 25-jul-18 | 49,1 | 0,0 | 67,20% | 4,02 | 3,89 | 3,19 | 4,68 | 3,55 |
| 30 | 10-jun-18 | 20,9 | 0,0 | 69,35% | 4,36 | 4,01 | 3,41 | 4,94 | 3,75 |
| 31 | 23-jul-18 | 40,9 | 0,0 | 75,50% | 4,18 | 4,03 | 3,28 | 4,75 | 3,60 |
| 32 | 02-jul-18 | 46,6 | 0,0 | 91,43% | 4,70 | 4,51 | 3,91 | 5,09 | 3,87 |
| 33 | 12-jul-18 | 46,7 | 0,0 | 77,39% | 4,69 | 4,52 | 3,93 | 5,08 | 3,87 |
| 34 | 17-jul-18 | 48,0 | 0,0 | 87,24% | 4,04 | 3,91 | 3,14 | 4,58 | 3,47 |
| 35 | 10-jul-18 | 43,9 | 0,0 | 66,38% | 3,64 | 3,53 | 2,69 | 4,32 | 3,27 |
| 36 | 13-jul-18 | 49,1 | 0,0 | 88,06% | 4,62 | 4,45 | 3,82 | 4,89 | 3,72 |
| | **Promedio Día 2** | **32,066** | **2,980** | **63,48%** | **4,379** | **4,219** | **3,127** | **5,030** | **3,826** |

**Tabla 37. Valores de COP calculados y estimados según los datos monitorizados durante el *Día 2* para cada comparativo seleccionado**

### 5.2.3. Principales conclusiones de la experimentación con el sistema combinado

El análisis de las tablas anteriores permite obtener una serie de conclusiones en lo referente al funcionamiento del sistema combinado frente al caso de la fachada activa desacoplada (Tabla 36), así como del comportamiento de la bomba de calor frente a la estimación realizada para sistemas equiparables (Tabla 37).

En lo que al comportamiento de la fachada se refiere y, de acuerdo con lo expresado en la Tabla 36, los aspectos principales a destacar para el ejercicio comparativo planteado son los que se enumeran a continuación:

- Se han comparado un total de 36 días. Los de la fachada desacoplada van desde diciembre hasta agosto y los del sistema acoplado desde enero hasta julio. Cuando la fachada trabaja acoplada a la bomba de calor, de media, se consigue incrementar 5,9 veces la respuesta de la fachada tanto para la producción ($Q_u$) como para el rendimiento ($\eta_{FA}$). Para obtener este cálculo se han considerado 34 días, descartando los comparativos nº7 y nº24 tal y como se describirá más adelante.
- Ha quedado demostrado que emplear un sistema combinado con una bomba de calor que esté produciendo agua caliente de forma intensiva, implica una mejora directa y sustancial en la respuesta de la fachada activa, consiguiendo valores de rendimiento muy superiores a los que se consiguen habitualmente con estos sistemas térmicos.
- Las comparaciones se han planteado escogiendo un día de la primera campaña con la fachada desacoplada (Día 1) frente a otro de la segunda campaña, pero que debe contar con unas condiciones ambientales asimilables al primero, en el que la fachada trabaja acoplada a la bomba (Día 2).
- La selección de días comparables implica ciertas limitaciones, ya que, en principio, se escogen días diferentes de cada campaña para compararlos entre sí. Sin embargo, se puede plantear la misma referencia para el Día 1 o Día 2 en comparativos diferentes.
    - De forma específica se han contemplado unos casos con el mismo Día 1 como referencia. Estos han sido los comparativos nº 11 y 12 (con el 24 de marzo como Día 1) y los comparativos nº 28 y 29 (el 24 de julio es la referencia del Día 1).
      Tal y como se aprecia la mejora en el rendimiento del colector varía puesto que las condiciones de carga del segundo día son diferentes también.
- Aunque las condiciones ambientales son bastante variadas en cuanto a situaciones alternativas para radiación y temperatura ambiente (Figura 118), en todos los casos se consigue una mejora del rendimiento de la fachada activa con el sistema acoplado (Día 2) frente al caso desacoplado (Día 1), siendo el menor incremento la variación de 1,2 veces observada en el comparativo nº1. En el otro extremo, se pueden llegar a alcanzar rendimientos de hasta 60 veces superiores, tal y como se aprecia para el comparativo nº28.
  En este punto merece la pena destacar la situación que se da en los comparativos nº24 y nº7 que alcanzan, respectivamente, incrementos de más de 51.000 y 168 veces, ya que la referencia del primer día es prácticamente nula. Con el fin de no distorsionar el cálculo del promedio de la serie de días analizada, este tipo de escenarios han sido excluidos del análisis de la mejora que se obtiene con el sistema acoplado, dejando esta información únicamente a modo ilustrativo.
- En términos generales, cuando se dan escenarios en los que hay mucha radiación:

- La mejora relativa en el rendimiento no suele ser tan elevada porque el valor de partida del Día 1, implica ya un rendimiento considerable.
- Sin embargo, en términos de producción ($Q_u$) y de rendimiento del sistema ($\eta_{FA}$) la mejora que se obtiene es, en términos generales, muy relevante: por ejemplo, los incrementos de la producción son de 2,5, 3,9 y 5,8 veces para los comparativos nº2, nº15 y nº35 respectivamente.
- Se aprecia de nuevo una limitación en la potencia máxima que se alcanza con la fachada solar, limitando también la producción y el aprovechamiento de energía solar, a pesar de la radiación abundante de los días soleados. Frente al caso desacoplado, se alcanzan incrementos de un 20-30% en general alcanzando los 200W/$m^2$.

- Para el caso contrario, con días de escasa radiación:
  - El sistema acoplado (Día 2) implica una mejora realmente destacable, ya que la producción en estos días representa un valor de producción importante, frente a la producción del caso desacoplado (Día 1) en el que la producción solar de la fachada es muy baja o cercana a cero.
  - Ejemplos para los días desacoplados (Día 1), sin apenas producción, son los comparativos nº7 y nº24, anteriormente citados y descartados para el cálculo, pero también para los comparativos nº6, nº21, nº25, nº28 y nº29, en los que la producción del primer día es muy baja o prácticamente nula a efectos prácticos, por lo que en cuanto se consigue una cantidad relevante de energía para el Día 2, la variación resultante es de varios órdenes de magnitud superior debido a que se han empleado esas referencias "casi-nulas".
  - Sin llegar a un caso tan extremo, otro ejemplo interesante puede ser el del comparativo nº18 en el que la producción de 0,09 kWh del Día 1 pasa a ser de 1,761 kWh en el Día 2.
  - Resulta destacable el fenómeno que se aprecia en algunos días del caso acoplado (Día 2), en los que se consiguen rendimientos por encima del 100%. Este fenómeno se debe a que la energía que se obtiene ya no proviene únicamente de la radiación solar, como fuente principal, sino que también se debe al intercambio por convección con el aire exterior [271] cuando no hay radiación (incluso durante la noche).
  - En general se concluye que: el sistema permite aprovechar al máximo la escasa radiación de los días poco soleados, e incluso, captar más energía que la radiación disponible.
- En lo que respecta a la fracción solar, el valor se sitúa en un 63,4%. Sin embargo, se debe tener en cuenta que este factor relaciona la energía recogida por el colector frente a la entregada por la bomba de calor y que los niveles térmicos de cada una de estas energías son diferentes (de media unos 30°C mayor el segundo caso). Por tanto, la relación entre ambas no es directa y el valor de este parámetro se debe considerar a modo de referencia.

Por otro lado, en lo referente a la bomba de calor y al sistema produciendo energía para una carga de calor (calefacción o ACS), los aspectos principales a destacar son los asociados a los diferentes valores de COP diario que se han obtenido para la bomba de calor (Tabla 37):

- El $COP_{GSHP}$ del sistema por geotermia es el que tiene el rendimiento mayor, siendo el $COP_{MAX}$ un 13% menor y para $COP_{FS}$, $COP_{ASHP}$ y $COP_{SYS}$ un 16%, un 24% y un 38% menores respectivamente.

- El $COP_{MAX}$, que resume la capacidad de la bomba de calor trabajando en los rangos de temperatura analizados es el valor máximo de rendimiento que alcanza la bomba de calor cuando trabaja acoplada al sistema solar.
    - Prácticamente en todos los días se encuentra por debajo del $COP_{GSHP}$, el sistema que se considera la referencia para el mayor rendimiento.
    - Esto se debe a que, en general, las temperaturas que obtenemos en el lado de la fuente son sustanciales (entre 10 y 12°C), pero no llegan a alcanzar los valores de la geotermia (cercanos a 15°C).
- El $COP_{FS}$ en el que incluimos la parte proporcional del sistema solar, obtiene unos valores bastante cercanos al $COP_{MAX}$ (un 3,6% menor de media), por lo que en términos generales se obtiene un buen resultado del sistema solar combinado (SAHP).
    - Sin llegar a alcanzar los rendimientos del sistema geotérmico, sí que se encuentra en la mayoría de las ocasiones con valores superiores a los de la aerotermia.
    - Se va a profundizar algo más en este aspecto al analizar, en el apartado 5.3, el resto de los días de la campaña experimental del sistema acoplado. Al considerar una campaña más extensa con más días que en el caso presentado, se dan ciertas variaciones, pero la relación que se da entre los COPs para sistemas diferentes se mantiene (Tabla 38 y Figura 122).
- Cuando se analiza la contribución de los equipos de distribución de aire en el $COP_{SYS}$, se aprecia el descenso significativo en el rendimiento del sistema combinado.
    - Debido al elevado consumo de electricidad, se da una reducción significativa del COP de un 38% menor que el del sistema geotérmico y un 29% menor que el $COP_{MAX}$ de media.
    - Sin embargo, este $COP_{SYS}$ no es equiparable a los otros cuatro que se presentan como referencia, $COP_{FS}$, $COP_{MAX}$, $COP_{ASHP}$ y $COP_{GSHP}$, puesto que ninguno de esos se tiene en cuenta el sistema de distribución de calor ya que, en línea con la caracterización de estos equipos, el rendimiento se centra básicamente en la bomba de calor como elemento principal.
    - Este fenómeno que se aprecia especialmente en aquellos días que la temperatura exterior es menor y en los que el sistema de calefacción por aire y la distribución implican unos bajos rendimientos, con COPs inferiores a 2 en algunos días de febrero (Tabla 37).
    - En este caso se puede apreciar claramente cómo penaliza la selección del tipo de sistema de distribución de aire caliente en el rendimiento del sistema, por lo que se constata que la solución resulta más competitiva para el caso de producción de ACS. Asimismo, se identifica también el interés en valorar alternativas para la distribución de calor en el sistema de climatización, como sistemas por suelo radiante o radiadores de baja temperatura.
- Otra conclusión general que se obtiene al analizar el sistema acoplado es que en general los peores rendimientos son los que se obtienen cuando se da uno de estos dos factores:
    - radiación baja
    - poca producción de la bomba de calor

    En términos generales cuando aumenta uno de estos dos factores, ó, los dos a la vez, el COP incrementa de forma significativa para los casos analizados.

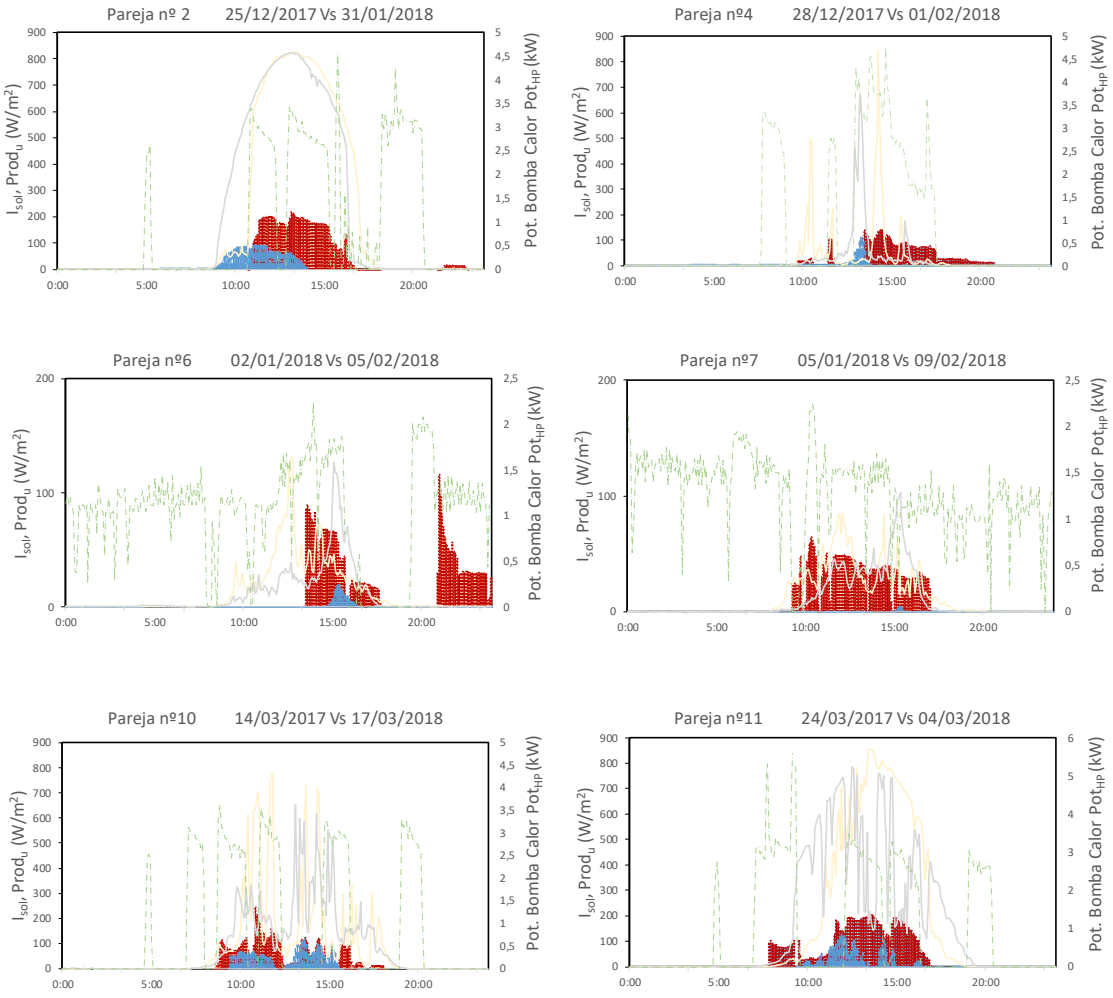
Con el fin de profundizar y describir de forma más gráfica la información planteada en los comparativos, la siguiente Figura 119 representa una selección de días en las que superponen

las curvas de radiación y de producción de los dos días comparados, así como la potencia producida por la bomba de calor.

Así, se puede apreciar de forma muy gráfica la diferencia en la producción resultante de la fachada activa cuando está desacoplada y cuando trabaja de forma conjunta con la bomba de calor, para dos días que tienen una cantidad de radiación diaria muy similar.

En los días despejados la evolución de la radiación es muy similar, pero los días de baja radiación a pesar de tener un total diario equiparable, no siempre cuentan con un desarrollo horario similar para la curva de radiación.

Por otro lado, en las gráficas se puede apreciar también cuando entra en funcionamiento la bomba de calor, gracias a la curva de potencia de producción representada.



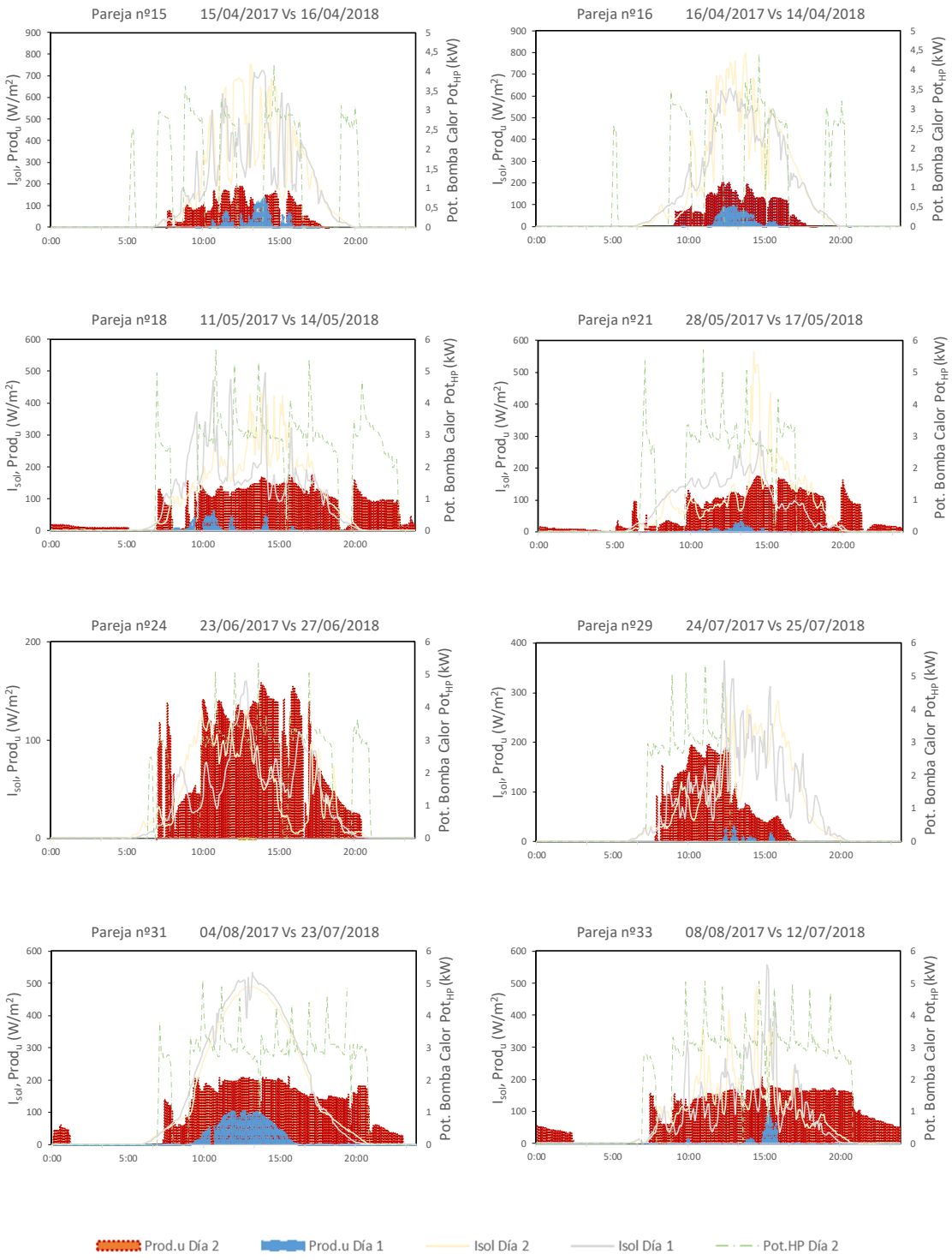



**Figura 119 Evolución de la radiación solar ($I_{sol}$), la energía útil producida por la fachada activa ($Prod_u$) y la potencia de la bomba de calor ($Pot_{HP}$) para diferentes comparativos contrastando el sistema con la fachada acoplada (área sombreada roja) frente a la fachada desacoplada (área sombreada azul).**

La selección de días recogidos en la Figura 119, representan condiciones variadas y alternativas a lo largo del año para el sistema combinado, en los que se pueden apreciar las diferencias entre las condiciones en invierno (enero y febrero) frente a las de verano (julio). Asimismo, cabe

destacar los siguientes aspectos en cuanto al funcionamiento del sistema combinado de fachada activa junto con la bomba de calor:

- En los diferentes días que se han contemplado, tanto en la Tabla 37 como en la Figura 119, se aprecian situaciones con diferentes perfiles de carga para ACS y calefacción y, en consecuencia, de producción de la bomba de calor.
- En términos generales la producción de ACS se da durante todo el año mientras que la producción de calefacción viene condicionada por las condiciones exteriores y se da mayoritariamente durante el invierno y algunos días en primavera.
- Los perfiles de carga presentados son coherentes con esta situación en los que se ha analizado la producción de ACS en todo momento mientras que la calefacción se ha valorado principalmente en febrero y marzo.
- Por otro lado, debido a las limitaciones en el sistema de distribución por calefacción que se ha mencionado anteriormente, asociado a la potencia de las baterías de intercambio de calor y de los conductos de distribución de aire caliente, esta aplicación para calefacción no permite aprovechar suficientemente el sistema combinado de fachada activa con la bomba de calor. Por ello, una vez confirmado este punto (en marzo), se ha trabajado mayoritariamente con ACS en los días sucesivos (abril-julio). Sin embargo, la energía entregada por la bomba de calor al sistema de calefacción resulta ser un dato relevante que también se puede tomar en consideración para plantear posibles sistemas alternativos de distribución para calefacción.
- En cualquier caso, esta situación es consecuente con un consumo típico de edificación residencial en el que la mayor demanda de calefacción se da en invierno mientras que el consumo de ACS permanece bastante estable a lo largo del año.
- Por otro lado, las pérdidas de distribución para el sistema de ACS son más similares a las de aplicaciones de este tipo, habiéndose cuantificado en un rango de 8-11% para la esta campaña experimental.
- En el caso del consumo de ACS, la producción se ha ido incrementando progresivamente para valorar diferentes escenarios de producción, siguiendo en todos los casos patrones de consumo en diferentes horas del día que resulten equiparables a un uso residencial o terciario con consumo significativo de ACS, como por ejemplo un polideportivo.
- Los valores de temperatura máxima que se han empleado para cada caso son de 57°C para la producción de ACS y de 43,5°C para la producción de agua para calefacción.
- Si se analiza la potencia a la que trabaja la bomba de calor se aprecia que cuando produce ACS la potencia media es del orden del doble que cuando trabaja en modo calefacción: 2,5 – 3,5 kW frente a 1 – 2 kW.
- Durante el desarrollo del estudio se ha analizado mayoritariamente el funcionamiento del sistema conectado a una de las dos cargas durante todo el día: ACS o calefacción, pero no de forma combinada.
    - De esta forma se pretende analizar el potencial del sistema en función del tipo de carga y se obtienen resultados independientes en cada caso. No obstante, cabe plantear soluciones combinadas alternando las dos cargas en función de patrones diferentes de consumo, si bien en este caso los escenarios que se pueden dar produciendo calor para ambas cargas son múltiples.
    - A pesar de que se ha identificado la limitación del sistema en cuanto al caso de calefacción y que, por tanto, la capacidad del conjunto para cubrir ambas cargas a la vez se ve también limitada, sí que se analizaron unos pocos días funcionando de esta manera combinada como se aprecia en los días 7 y 21 de febrero de

2018 y 23 de marzo de 2018. Las curvas representativas que se dan el día 21 de febrero son las que se muestran en la Figura 120 siguiente.

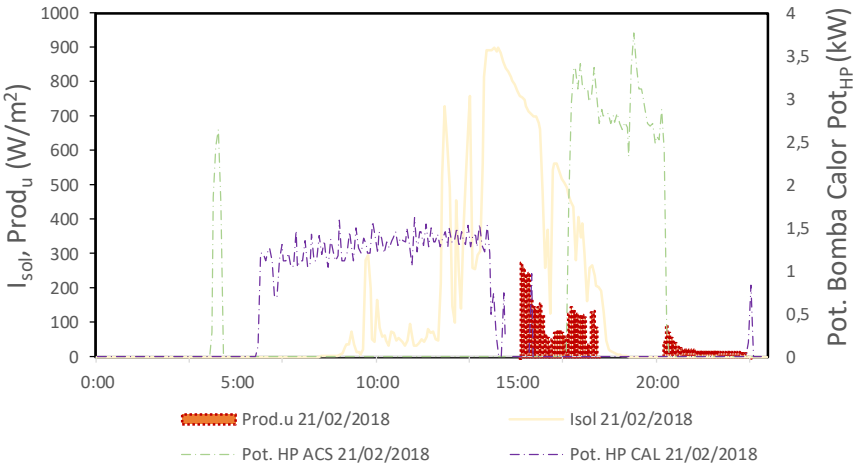



**Figura 120 Evolución de la radiación ($I_{sol}$), la producción solar de la fachada activa ($Prod_u$) y la potencia de la bomba de calor para producir ACS ($Pot_{HPACS}$) y calefacción ($Pot_{HPCAL}$)durante el 21/02/2018.**

- En cuanto al comportamiento de la fachada activa, se aprecia que la producción solar de esta aumenta a medida que aumenta la carga acoplada. El hecho de que la bomba de calor esté produciendo mucha cantidad de agua caliente implica que el campo solar recoge más energía y que, por tanto, su rendimiento aumenta. Además, aunque de menor intensidad, se aprecian producciones en ausencia de radiación, como por ejemplo los días 14 y 17 de mayo de 2018 (Fila 5 de la Figura 119).
- La potencia de producción máxima de la fachada activa se encuentra limitada a un valor algo superior al del caso de los días desacoplados, siendo cercano a los 200W/m$^2$, por lo que, en este caso, la contribución del sistema acoplado a incrementar dicho valor resulta estar más vinculada al diseño del panel que al modo de operación, tal y como se ha discutido en el capítulo III. No obstante, el sistema acoplado permite trabajar más tiempo y de forma más intensa en ese rango superior, lo que redunda en una mayor producción solar y rendimiento de la fachada activa.
- En los días con mucha radiación se aprecia que se alcanza ese valor pico de 200W/m$^2$, mientras que cuando la radiación es menor los máximos suelen ser significativamente menores, por debajo de los 100W/m$^2$ como los días 5 y 9 de febrero de 2018 (Fila 2 de la Figura 119). La forma de elevar este valor de potencia máxima del colector cuando no hay radiación es incrementar la producción de la bomba de calor, como se puede apreciar en el día 27 de Junio de 2018.

## 5.3. Resultados experimentales para el sistema combinado de circuito solar con fachada activa y bomba de calor. Campaña experimental completa

Con el fin de obtener resultados adicionales que permitan conocer mejor el comportamiento del sistema acoplado, se presenta en este apartado la campaña experimental completa que consta de 118 días en los que, además de los 36 que se han empleado para el comparativo presentado en el apartado 5.2.2, se cuenta con una buena cantidad de días adicionales que, sin

tener otro equiparable funcionando con la fachada desacoplada, proporcionan información valiosa para el análisis del sistema.

El análisis completo para estos 118 días dio como resultado una producción diaria promedio de 2,25 kWh/m$^2$ para la fachada activa y un rendimiento promedio del 71,45%.

Los valores promedio que se han obtenido durante toda la campaña experimental, tanto para los diferentes COPs calculados y estimados, así como para las temperaturas monitorizadas en la bomba de calor cuando se trabaja en diferentes regímenes, son los que se describen en las siguientes tablas.

| | $COP_{MEDIO}$ | $COP_{ACS}$ | $COP_{CALEF.}$ | $COP_{COMB.}$ |
|---|---|---|---|---|
| $COP_{MAX}$ calculado del sistema SAHP | 4,18 | 4,18 | 4,10 | 4,18 |
| $COP_{FS}$ calculado del sistema SAHP | 4,02 | 4,00 | 4,03 | 4,07 |
| $COP_{SYS}$ calculado del sistema SAHP | 2,86 | 2,98 | 1,69 | 2,24 |
| $COP_{GSHP}$ estimado para el sistema GSHP | 4,95 | 4,89 | 5,40 | 5,36 |
| $COP_{ASHP}$ estimado para el sistema ASHP | 3,76 | 3,71 | 4,12 | 4,09 |

**Tabla 38. Valores de COP promedio calculados y estimados para el sistema acoplado durante toda la campaña experimental realizada**

| | $T_{Max}$ (°C) | $T_{imp}$ (°C) | $T_{ret}$ (°C) |
|---|---|---|---|
| Producción ACS | 57 | 43,28 | 38,13 |
| Producción Calefacción | 43,5 | 34,39 | 30,13 |
| Producción Combinada | 57/43,5 | 36,92 | 32,45 |

**Tabla 39. Temperaturas promedio para cada tipo de régimen de producción empleado durante la campaña experimental**

| | $T_{imp}$ (°C) | $T_{ret}$ (°C) |
|---|---|---|
| Temperaturas promedio en el lado de la carga | 42,37 | 37,31 |
| Temperaturas promedio en el lado de la fuente | 11,15 | 8,71 |

**Tabla 40. Temperaturas promedio a ambos lados de la bomba de calor registradas durante la campaña experimental**

Al analizar los valores de COP obtenidos se toma como referencia principal el $COP_{FS}$ que es el que tiene en consideración el sistema activo solar y se confirma la relación obtenida en el caso anterior en el que la tecnología combinada se sitúa por debajo de los valores del caso geotérmico y por encima de la aerotermia.

La diferenciación respecto de la aerotermia es mayor cuando se produce ACS y el rendimiento del sistema combinado se acerca más al caso de la geotermia, mientras que cuando se da producción de calefacción o combinada ACS/calefacción, la aerotermia se encuentra en un nivel

equiparable al del sistema combinado y la solución geotérmica sí que implica una mayor diferencia con un rendimiento superior de hasta 1,3 puntos más.

En cualquier caso, resulta necesario en este punto volver a destacar que el comparativo toma en consideración valores de COP calculados y basados en datos monitorizados, frente a valores teóricos estimados que, de acuerdo con la fuente de la que se han extraído las expresiones para calcularlos [284], son en general algo superiores a los que se observan en condiciones experimentales.

Para ilustrar la evolución que se da en los diferentes COPs, la siguiente Figura 121 muestra como frente al $COP_{GSHP}$ que es el más elevado en prácticamente todos los casos, los otros tres factores a comparar $COP_{MAX}$, $COP_{FS}$ y $COP_{ASHP}$, progresan de una forma bastante similar.

En los primeros días en los que la producción de calefacción es significativa no se distinguen grandes diferencias entre ellos, pero a medida que la calefacción se va eliminando y aparece la producción de ACS como la carga principal, el rendimiento del sistema por aerotermia va disminuyendo.

Por otro lado, El $COP_{SYS}$ es el rendimiento menor, debido a la contribución de la electricidad consumida por los equipos de distribución, que es muy intensa cuando se produce calefacción y se atenúa cuando se produce ACS ya que únicamente se activa el sistema de extracción de aire con un caudal y consumo reducidos.

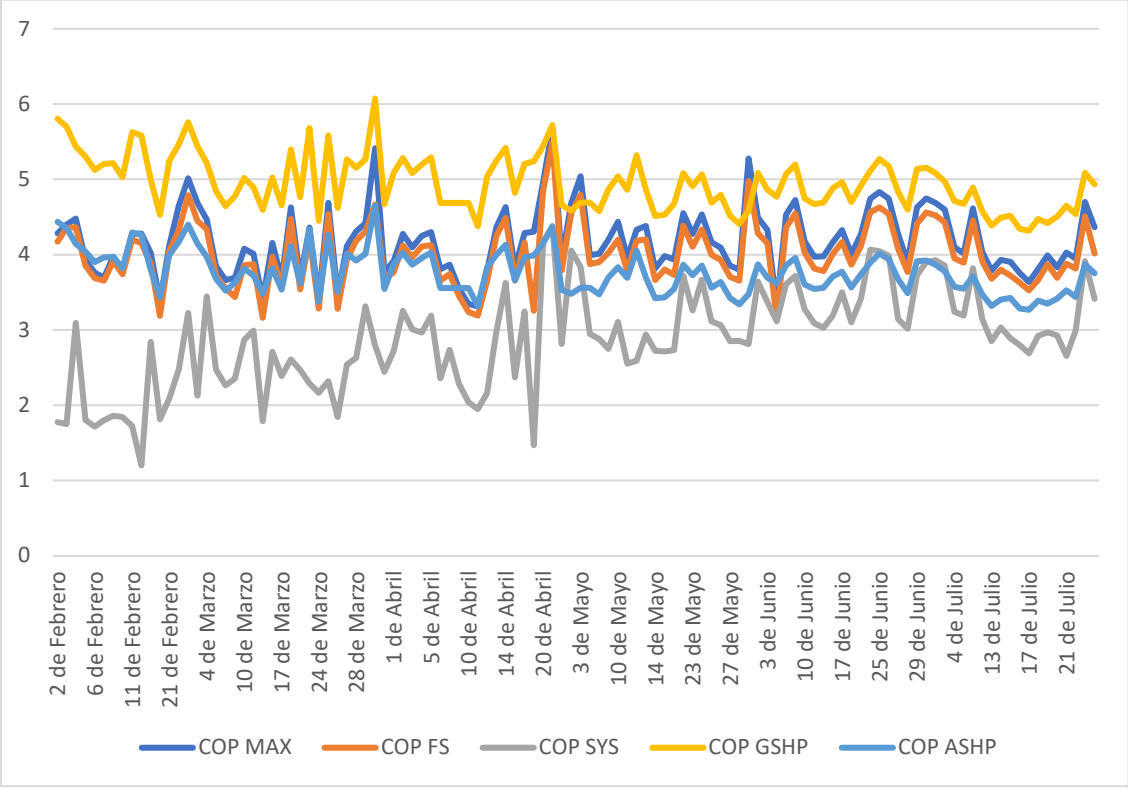



**Figura 121 Diferentes valores de COP calculados y estimados para la campaña experimental completa considerando 118 días.**

Puesto que con el sistema SAHP combinado no se alcanza el nivel de la geotermia, se va a analizar en más detalle las diferencias que se dan entre el sistema acoplado y la aerotermia.

Al comparar el $COP_{FS}$ con $COP_{ASHP}$, la Figura 122 siguiente muestra con mayor detalle las diferencias que se dan entre estos dos factores, en donde se aprecia la mejora comparativa del sistema solar de en torno a 0,5 puntos cuando se da una producción relevante de ACS.

Cuando hay más producción de calefacción la diferencia es menor, aunque en general el sistema solar también obtiene un resultado mejor.

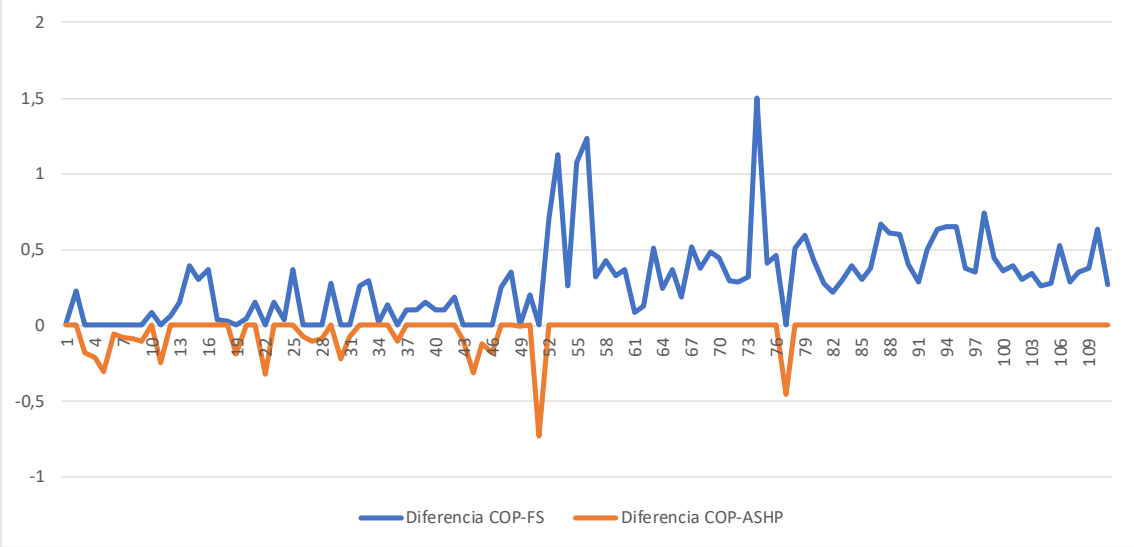



**Figura 122 Comparación entre el $COP_{FS}$ y el $COP_{ASHP}$ para la campaña experimental desarrollada.**

Finalmente, el último resultado relevante que se ha obtenido tras el análisis de esta segunda campaña experimental es la relación que se identifica entre el rendimiento y la radiación solar. Así como en el caso desacoplado no se apreciaba relación entre estos dos factores y sí entre la radiación y la producción (Figura 111 y Figura 112), en este caso, con el sistema acoplado no se aprecia que la producción y radiación presenten una correlación, pero sí que aparece una relación entre el rendimiento que resulta de la fachada activa y la radiación incidente en el plano de la fachada.

La siguiente Figura 123 presenta la forma de la curva que se da entre ambos factores para el total de 118 días analizados.

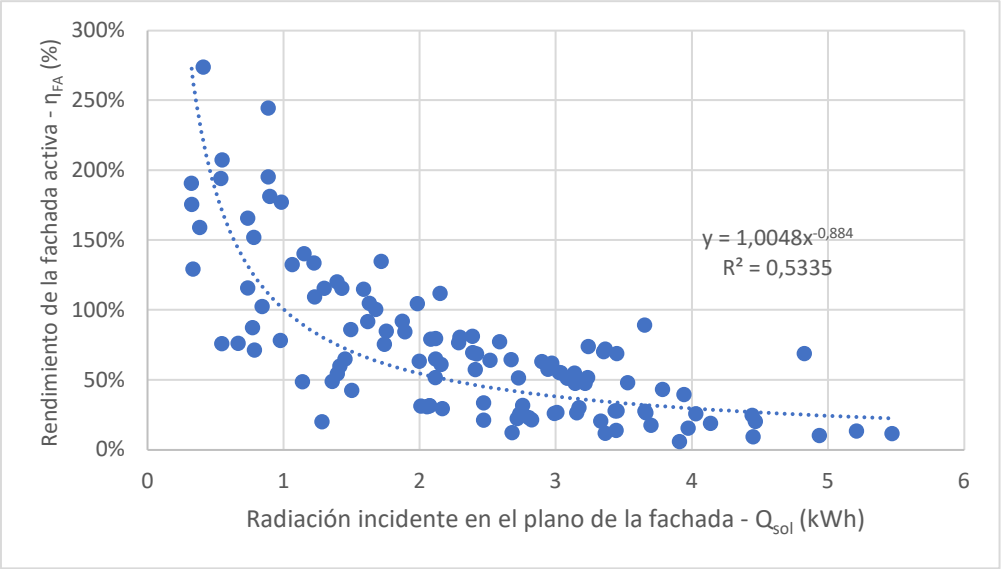



**Figura 123 Relación entre radiación incidente en el plano de la fachada ($Q_{sol}$) y rendimiento de la fachada activa ($\eta_{FA}$) para la monitorización del sistema acoplado a una bomba de calor**

En este caso, puesto que la carga es el factor que determina en mayor medida la mejora del rendimiento de la fachada activa en el sistema combinado, se puede descomponer la figura en función del tamaño de la carga acoplada.

De esta forma se aprecia que cuando se trabaja con un sistema combinado, la relación que se establece entre rendimiento y radiación adopta una curva con forma potencial en el que los factores principales se determinan en función del tamaño de la cantidad de energía que se produce con la bomba de calor.

Si se toman, por un lado, valores diferentes de cargas y se analiza el sistema considerando principalmente los casos en los que se da producción de ACS (descartando aquellos de únicamente producción de calefacción), el resultado es el que se aprecia en la Figura 124 siguiente.

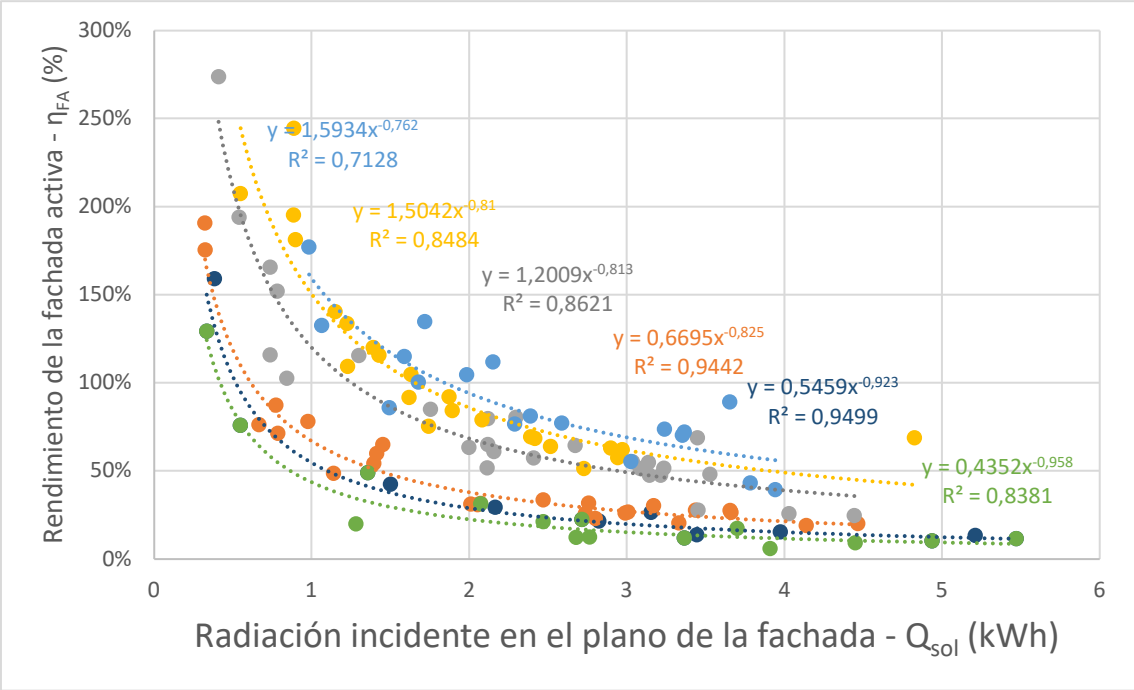



**Figura 124 Relación entre radiación incidente en el plano de la fachada ($Q_{sol}$) y rendimiento de la fachada activa ($\eta_{FA}$) para diferentes valores de carga. Monitorización del sistema de fachada activa acoplado a una bomba de calor**

Este enfoque de analizar escenarios con presencia mayoritaria de ACS (valores de más de 3,4 kWh) es consistente con los resultados presentados anteriormente en los que el sistema trabaja de forma más estable y con rendimientos mayores.

La forma específica de la curva obtenida para estos modos de funcionamiento es la que se presenta en la ecuación (44). Por otro lado, los factores que determinan los términos de dicha ecuación en función del tamaño de la carga de ACS son los que se presentan en la Tabla 41.

$$\eta_{FA-HP} = A\,(Q_{Sol})^{B} \tag{44}$$

| Energía diaria producida (ACS) | Factor A | Factor B | $R^2$ |
|---|---|---|---|
| 3,4 – 8,6 kWh | 0,4352 | -0,958 | 0,8381 |
| 10,7 – 19,2 kWh | 0,5459 | -0,923 | 0,9499 |
| 20,9 – 26,33 kWh | 0,6695 | -0,825 | 0,9442 |
| 26,4 – 39,9 kWh | 1,2009 | -0,813 | 0,8621 |
| 40,1 – 44,7 kWh | 1,5024 | -0,81 | 0,8484 |
| 45,0 – 51,03 kWh | 1,5934 | -0,762 | 0,7128 |

**Tabla 41. Factores de la ecuación obtenida experimentalmente (44) relacionando radiación incidente en el plano y rendimiento de la fachada activa**

Una conclusión final, relevante a considerar en cuanto a estos resultados del sistema acoplado, es el hecho de que, si se compara un día con baja radiación y alto rendimiento de la fachada, la energía útil que proporciona el sistema puede ser insuficiente, frente al caso de un día con mayor radiación y rendimiento menor, pero con una producción solar más elevada y que sirva para cubrir las necesidades energéticas. Es decir, que, frente a un escenario de máximo rendimiento pero en los que la energía no alcanza para las necesidades planteadas, puede ser necesario contemplar rendimientos menores pero que sí que proporcionan suficiente energía.

Este caso lo ilustra, por ejemplo, la relación que se da entre los días 5 y 16 de febrero de 2018.

- En el primero la radiación solar total diaria es de 0,317 kWh, el rendimiento de la fachada activa es de 95,6% y la producción solar diaria correspondiente de 0,303 kWh.
- En el segundo, la radiación solar total diaria es de 2,173 kWh, el rendimiento de la fachada activa es de 29,37% (tres veces menor que el anterior) y la producción solar diaria correspondiente de 0,638 kWh, es decir, el doble de la obtenida el día 5 de febrero.

# 6. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA CAMPAÑA EXPERIMENTAL

La extensa campaña experimental desarrollada ha ofrecido unos resultados muy relevantes en cuanto al comportamiento de la fachada activa. El análisis desarrollado ha permitido valorar la respuesta del sistema bajo tres enfoques diferentes:

- En primer lugar, se ha desarrollado una primera campaña de monitorización para analizar el comportamiento de la fachada activa trabajando de forma desacoplada. En este caso, el sistema analizado consiste en un circuito solar aislado en el que el tanque de almacenamiento se carga y descarga en ciclos diarios recogiendo la energía a través del colector integrado en la fachada.
- Más adelante, en una segunda campaña se ha analizado el funcionamiento de un sistema combinado que además del circuito solar indicado, incorpora una bomba de calor como equipo de producción principal que aprovecha la energía recogida por la fachada activa. Esta solución ha permitido estudiar la respuesta de cada uno de los dos elementos principales del sistema: la fachada activa y la bomba de calor.
- En paralelo, la posibilidad de comparar ambas campañas permite considerar el comportamiento de cada una de estas dos tecnologías de forma independiente y trabajando conjuntamente. Este aspecto resulta ser una de las contribuciones más interesantes del estudio, puesto que permite valorar la mejora significativa qué se obtiene para cada elemento cuando se hace trabajar al sistema de forma combinada.

Las principales conclusiones que se han obtenido de cada campaña experimental tanto para el sistema desacoplado como acoplado son las que se enumeran a continuación.

*Sistema desacoplado*

Para el sistema desacoplado los rendimientos y producción que se consiguen son modestos (valores máximos <25% y 10,2% de media) aunque la cantidad de energía que se consigue por unidad de superficie (de media diaria 306 Wh/m$^2$) permitiría considerar esta solución si se cuenta con suficiente superficie de fachada activa.

En este modo se ha analizado el sistema desacoplado y se ha podido valorar tanto las características del sistema en cuanto a la potencia producida, quedando la producción solar siempre bajo la campana que describe la radiación solar en un día soleado. También se ha identificado que la potencia máxima alcanzada por la fachada ha sido 160W/m$^2$ a pesar de que puntualmente se ha superado dicho valor lo que hace indicar que la limitación se debe más a la cantidad máxima de radiación disponible en un ciclo diario.

Asimismo, se ha constatado la relación de la fachada con el ciclo diario, la capacidad del depósito, la cantidad de superficie activa y lo importantes que son el caudal y la temperatura de impulsión.

*Sistema Acoplado*

Para el sistema acoplado la ventaja que se consigue es muy significativa con rendimientos y producciones 7 veces superiores 71,45% y 2,25 kWh/m$^2$ respectivamente, si se comparan

directamente ambas campañas experimentales a pesar de que las condiciones ambientales y de producción para las cargas asociadas varía significativamente.

Con el fin de matizar el incremento que se da entra las dos situaciones, se ha planteado una comparación entre ambos escenarios seleccionando días que puedan considerarse equiparables y la mejora relativa que ha resultado de ese contraste ha sido de 5,9 veces mayor para el rendimiento y la producción solar.

Como primera conclusión, se ha constatado que en todos los casos se da una mejora en el rendimiento de la fachada activa cuando trabaja junto con la bomba de calor y que el nivel que puede llegar a alcanzar dicha mejora depende fundamentalmente de las condiciones de trabajo de la bomba de calor y de la cantidad e intensidad de la energía que tiene que producir para cubrir las cargas térmicas.

En este caso, también se ha cuantificado la limitación máxima de la fachada activa en cuanto a la potencia que se alcanza, aunque resulta algo superior al del caso desacoplado (200W/$m^2$). Sin embargo en el modo combinado se consigue hacer trabajar al sistema fuera de las horas que describen la campana solar, por lo que la fachada activa recoge energía incluso cuando la radiación es escasa o nula, dando lugar incluso a rendimientos superiores al 100% si se considera la proporción con la radiación total diaria (ecuación (6)). Por tanto, el significado del factor "rendimiento" en este caso debe considerarse con esta matización.

Lógicamente este modo de operación está asociado a la carga que consume la energía y que requiere que la bomba de calor extraiga el calor del depósito solar para cubrir esa demanda.

Se ha identificado una relación entre la radiación y el rendimiento descrita por la ecuación (44) en función de la energía producida por la bomba de calor para satisfacer la carga térmica.

En cuanto al rendimiento obtenido, el valor del COP del sistema solar (SAHP) se puede considerar que, en prácticamente en todos los casos, el rendimiento es superior al del caso de una bomba por aerotermia pero sin llegar a alcanzar rendimientos como los de la geotermia. Esto se debe a que en general las temperaturas que obtenemos en el lado de la fuente son sustanciales (entre 10 y 12°C), pero no llegan a alcanzar los valores de la geotermia (cercanos a 15°C).

A este respecto cabe destacar que se trata de una comparación entre rendimientos medidos en la experimentación de la bomba de calor y rendimientos calculados que, en general, y de acuerdo con estudios previos, suelen ser algo superiores que los que se obtendrían en condiciones reales.

En cuanto a la carga acoplada a al sistema, se ha analizado el conjunto trabajando para producir tanto ACS como calefacción, pero en general con una única carga cada vez, puesto que el sistema está limitado a cubrir únicamente una cada vez. Además de la capacidad máxima de producción, se ha identificado una limitación importante para la distribución de aire caliente, por lo que en

gran medida se ha trabajado con escenarios de producción de ACS. A pesar de esto y de que no se haya trabajado en detalle los aspectos asociados a la distribución el agua caliente producida por la bomba de calor, se considera que el sistema es compatible con múltiples soluciones de distribución para calefacción (fancoils, suelo radiante, etc.). Se considera que el empleo de este tipo de elementos permitiría mejorar sustancialmente el rendimiento en modo calefacción, por lo que se propone esta línea de investigación para estudios futuros.

La influencia que la carga tiene en la respuesta del sistema es un aspecto de gran interés tal y como se ha puesto de manifiesto en los resultados obtenidos. Así cabe destacar la importancia de la necesidad de establecer una relación competitiva entre la producción solar y la producción de la bomba de calor, tomando en consideración que, cuanto mayor sea la producción de la bomba de calor y más sincronizada esté con la producción solar, mayores serán los rendimientos de la fachada activa. El sistema debería, en un caso ideal, estar produciendo de forma continuada cuando haya radiación solar significativa, si bien el sistema puede incluso funcionar sin radiación solar, aunque en esas condiciones el sistema resulta, en general, menos competitivo que la aerotermia.

En línea con lo anterior, la importancia de trabajar con ciclos diarios es otro aspecto a tomar en consideración. La energía recogida en un día debe ser consumida idealmente antes del día siguiente, de tal forma que se le da al depósito solar margen para "regenerarse" y volver a empezar el ciclo del día siguiente desde un punto de partida ventajoso, para maximizar producción y rendimiento. Sin embargo, esta dinámica dependerá de las condiciones ambientales de los días sucesivos en los que, si se encadena un periodo prolongado desfavorable, la respuesta del sistema no será tan ventajosa. De esta forma, el patrón más regular que adopta el consumo de ACS resulta ser muy favorable en este caso, puesto que apenas varía a lo largo del año, mientras que la producción de calefacción cuenta con una mayor incertidumbre ya que se activa en función de las condiciones exteriores (temperaturas bajas). La relación entre estas dos cargas y la posibilidad de plantear una priorización de ACS dejando el remanente posible para la producción de calefacción es una idea a valorar en etapas futuras del desarrollo.

La influencia que tienen las condiciones particulares que se han dado para desarrollar ambas campañas experimentales es otro aspecto a tomar en consideración a la hora de valorar los resultados que se han obtenido. Las condiciones ambientales exteriores de radiación, temperatura ambiente y velocidad del viento no pueden ser controladas y los casos de análisis quedan sujetos a las condiciones dadas cuando se ha monitorizado el sistema entre marzo de 2017 y agosto de 2018. En este caso, las condiciones monitorizadas no pueden considerarse como un "año estándar", aspecto sobre el que se va a profundizar más en el próximo y último capítulo de la tesis.

En cualquier caso, la información obtenida monitorizando un total de 264 días de un total de 540, en diferentes épocas del año, sí ha permitido valorar, analizar y caracterizar mejor el modo en el que se comporta tanto la fachada activa como el sistema combinado en condiciones muy variadas y diversas, incluyendo situaciones extremas en invierno y verano. A pesar de que en esas condiciones extremas la información es algo más limitada, los resultados generales obtenidos permiten valorar y prever la respuesta del sistema en la mayor parte de las situaciones que se puedan dar. Para afrontar escenarios extremos muy adversos, al igual que ocurre con todos los sistemas que se basan en fuentes renovables intermitentes y, en cierta medida,

difíciles de predecir, se deben incorporar al sistema elementos complementarios que permitan soportar esas situaciones con ciertas garantías.

En futuras etapas del desarrollo del sistema, con el fin de obtener una solución más robusta, se deberían plantear y estudiar alternativas para situaciones límite como las descritas. Sin que se trate de una relación exhaustiva de soluciones a considerar, se describen a continuación algunos ejemplos.

- En invierno, con bajas temperaturas y sin radiación, se pueden incluir medidas de prevención basadas en las soluciones empleadas por la tecnología para las bombas de calor (sistema de descongelación accionado eléctricamente o mezclas de agua con glicol/alcohol). Este mismo sistema de producción de calor basado en resistencias eléctricas es el que se considera generalmente para alcanzar la producción de calor necesaria en los días más desfavorables.
- En verano, el posicionamiento del colector orientado verticalmente hacia el sur implica que los picos de radiación más altos no coinciden con los meses calurosos, por lo tanto, los problemas de sobreproducción y sobrecalentamiento son menos significativos, lo que permite diseños más equilibrados.

Para finalizar el análisis de los resultados de la campaña experimental completa, cabe destacar que se cuenta todavía con margen de mejora para la solución de fachada activa puesto que se trata de la primera versión del prototipo de la solución para la que ya se han identificado mejoras potenciales en el capítulo III. Asimismo, experiencias similares [290] desatacan que existen otra serie de posibilidades y de alternativas con las que combinar y hacer trabajar al sistema combinado con las que se pueden llegar a alcanzar resultados más favorables.

# 7. CONCLUSIONES

En este cuarto capítulo se ha planteado un análisis amplio y exhaustivo con el que se ha buscado cuantificar y comprender mejor el comportamiento del sistema de fachada solar activa en condiciones reales de uso. Para ello, se ha desarrollado una extensa campaña experimental en la que se ha analizado la respuesta del sistema, permitiendo valorar tanto la energía útil que se consigue gracias al sistema activo dentro de un circuito solar aislado, así como de la combinación de dicho circuito solar con una bomba de calor, proporcionando así una oportunidad para estudiar la respuesta de ambas tecnologías cuando trabajan de forma conjunta.

Se trata por tanto de un paso más en la validación del diseño desarrollado y descrito en el capítulo anterior, demostrando que la energía que se obtiene a través de esta solución activa es significativa y que fluctúa en función de las condiciones de trabajo, en línea con el estudio paramétrico presentado en aquel capítulo.

El análisis presentado en este caso se basa en una campaña experimental llevada a cabo en KUBIK®, por lo que, tras describir el proceso que se ha adoptado para diseñar la experimentación, y el principal equipamiento empleado, se han presentado a continuación los resultados más significativos monitorizados. De esta forma ,se han analizado los rendimientos del sistema completo y de sus componentes principales, desarrollando escenarios equiparables a condiciones reales de funcionamiento del conjunto.

Los resultados y conclusiones más significativos son que el rendimiento de la fachada aumenta en el caso acoplado y que, en esa situación, se establece una relación entre radiación y rendimiento, así como que el COP que se consigue es competitivo siendo en general superior al de la aerotermia, pero no tan eficiente como el de la geotermia.

De esta forma en este cuarto capítulo se ha cubierto de forma satisfactoria el objetivo principal pretendido, que no era otro que comprender y cuantificar adecuadamente la respuesta de la fachada activa trabajando bajo diferentes condiciones, así como en el modo acoplado y desacoplado.

Como consecuencia directa, se ha confirmado que el sistema propuesto es una alternativa viable con respecto a otras soluciones que pueden ser menos competitivas y/o técnicamente complicadas en ciertos casos. Por citar algunas, las limitaciones de espacio son una clara restricción para los colectores colocados en cubierta en entornos urbanos densos, mientras que la superficie radiada en las fachadas prácticamente está sin explotar. Asimismo, también existen limitaciones para los sistemas geotérmicos, especialmente en casos de rehabilitación en los que el terreno no está accesible para realizar perforaciones o también debido a los elevados costes que se asocian a la limitación de espacio para desarrollar la tecnología.

En el próximo capítulo quinto y último de conclusiones se va a analizar el rendimiento que el sistema propuesto permite obtener y su aplicación directa en un escenario de edificación para valorar la ventaja competitiva que ofrece esta solución frente a sistemas comparables. Sin tomar el presente sistema combinado SAHP como solución definitiva, se valorará la solución actual, variantes de esta y de otras tecnologías a modo de referencia, de tal forma que se pueda dar información relevante y de aplicación para arquitectos e ingenieros que puedan tomar en consideración la solución actual como una alternativa en el diseño de edificios.

# 8. REFERENCIAS


[261] Elguezabal, P., Lopez, A., Blanco, J. M., & Chica, J. A. (2020). Assessment on the Efficiency of an Active Solar Thermal Facade: Study of the Effect of Dynamic Parameters and Experimental Analysis When Coupled / Uncoupled to a Heat Pump. Energies, 13 (3) (597). https://doi.org/https://doi.org/10.3390/en13030597

[262] Elguezabal, P., Lopez, A., Blanco, J. M., & Chica, J. A. (2019). New concept of solar collector integrated into a sandwich panel as an active façade; CFD based parametric assessment and case study. DYNA, 94, 691–698. https://doi.org/ http://dx.doi.org/10.6036/9274

[263] Elguezabal, P., Lopez, A., Blanco, J.M., Chica, J.A. (2019). Parametric assessment of a building active façade by means of a combined metallic sandwich panel with an unglazed solar collector. MATEC Web Conf. 282 02046 (2019). DOI: https://doi.org/10.1051/matecconf/201928202046

[264] Boudjabeur, S., Harper, C., Elguezabal, P., Garay, R., Chica, J.A., Aranburu, L., … Toledo, C. (2018). Building active steel skin. (BASSE). Grant agreement nº: RFSR-CT-2013 - 00026. Final report, ISBN 978-92-79-94133-7. ISSN 1831-9424. https://publications.europa.eu/en/web/general-publications/publications

[265] Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., & Rubel, F. (2006) World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. Meteorologische Zeitschrift, vol. 15; 2006. pp. 259-263.

[266] Agencia Estatal de Meteorología. AEMET. Valores climatológicos normales. Bilbao Aeropuerto. http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/datosclimatologicos/

[267] Datos de radiación Solar de España. http://www.adrase.com/

[268] Juan Manuel Sancho Ávila, Jesús Riesco Martín, Carlos Jiménez Alonso, Mª Carmen Sánchez de Cos Escuin, José Montero Cadalso, María López Bartolomé. (2012) Atlas de radiación Solar de España. Atlas de Radiación Solar en España utilizando datos del SAF de Clima de EUMETSAT. AEMET. Agencia Estatal de Meteorología 2012.

[269] https://solargis.info/

[270] Comisión Europea. PVGIS. https://ec.europa.eu/jrc/en/pvgis

[271] Hadorn J.C. (Ed.), (2015). Solar and Heat Pump Systems for Residential Buildings. Wiley - ISBN: 978-3-433-03040-0

[272] NIBE. https://www.nibe.es/About-NIBE/

[273] WILO. https://wilo.com/en/About-Wilo/Facts-Figures/

[274] Bomba de circulación WILO. https://wilo.com/ar/es/Productos-y-aplicaciones/B%C3%BAsqueda-de-series/Stratos-25-1-12_1527.html

[275] Productos NIBE. https://www.nibe.es/Products/

[276] Sensores de temperatura Thermo Sensor. https://www.thermo-sensor.de/home.html

[277] Contadores de calor Kamstrup. https://www.kamstrup.com/es-es/soluciones-de-medicion-de-calefaccion/contadores-de-calefaccion

[278] Piranómetro CMP6 de Kipp & Zonen. https://www.kippzonen.com/Product/12/CMP6-Pyranometer

[279] Estación meteorológica Vaisala. https://www.vaisala.com/es/products/instrumentos-sensores-y-otros-dispositivos-de-medicion/estaciones-meteorologicas-y-sensores/wxt530

[280] Analizador de redes Carlo Gavazzi. http://gavazziautomation.com/

[281] PLC Beckhoff. https://www.beckhoff.com/twincat/

[282] Protocolo de comunicación Modbus. http://www.modbus.org/about_us.php

[283] M. C. Munari Probst, & C. Roecker, (2011) Architectural Integration and Design of Solar Thermal Systems. 1st Edition. EPFL Press. Lausanne, Switzerland. ISBN-13: 978-0415667913.

[284] Staffell, I., Brett, D., Brandon, N., & Hawkes, A. (2012). A review of domestic heat pumps. Energy & Environmental Science, 5(11), 9291.

[285] Rodríguez-Hidalgo, M. C., Rodríguez-Aumente, P. A., Lecuona, A., Gutiérrez-Urueta, G. L., Ventas, R. Flat plate thermal solar collector efficiency: Transient behavior under working conditions. Part I: Model description and experimental validation. Appl. Therm. Eng 2011, 31, 2394–2404. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.04.003

[286] Rodríguez-Hidalgo, M. C., Rodríguez-Aumente, P. A., Lecuona, A., Gutiérrez-Urueta, G. L., Ventas, R. Flat plate thermal solar collector efficiency: Transient behavior under working conditions part II: Model application and design contributions. Appl. Therm. Eng 2011, 31, 2385-2393. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.04.002

[287] Chen, Z., Furbo, S., Perers, B., Fan, J., Andersen, E. Efficiencies of flat plate solar collectors at different flow rates. Energy Procedia 2012, 30, 65–72. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.11.009

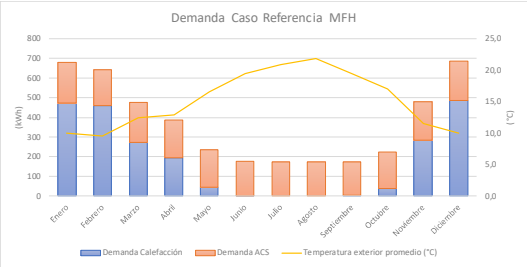
[288] Medved, S., Arkar, C., & Černe, B. (2003). A large-panel unglazed roof-integrated liquid solar collector-energy and economic evaluation. Solar Energy, 75, 455–467. https://doi.org/10.1016/j.solener.2003.09.009

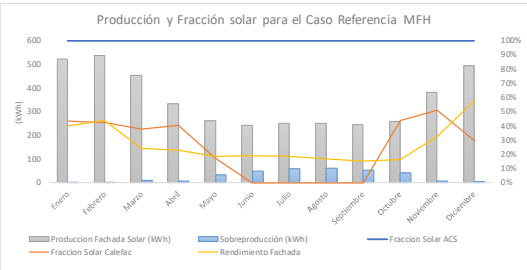
[289] Çomakli, K., Çakir, U., Kaya, M., & Bakirci, K. (2012). The relation of collector and storage tank size in solar heating systems. Energy Conversion and Management. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.01.031

[290] Haller, M. Y., Haberl, R., Mojic, I., Frank, E. Hydraulic integration and control of heat pump and combi-storage: Same components, big differences. Energy Procedia 2014, 48, 571–580. https://doi.org/10.1016/j.egypgoro.2014.02.067

# CAPITULO V. Conclusiones. Aplicación del sistema de fachada activa

1. INTRODUCCION
2. REVISIÓN DE LOS PRINCIPALES RESULTADOS OBTENIDOS EN LOS CAPITULOS PREVIOS
3. PLANTEAMIENTO DEL CASO DE ESTUDIO
4. ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS PARA CONSIDERAR DIFERENTES ESCENARIOS
5. INCIDENCIA DEL SISTEMA ACTIVO CONTEMPLANDO ESCENARIOS ALTERNATIVOS
6. BENEFICIOS DE LA SOLUCIÓN EN TÉRMINOS DE AHORRO ENERGÉTICO Y ECONOMICO
7. CONCLUSIONES PRINCIPALES DE LA TESIS
8. REFERENCIAS




*Para concluir la tesis, en este quinto y último capítulo se responde a la pregunta principal planteada al inicio del desarrollo: ¿hasta qué punto resulta relevante emplear fachadas solares en aplicaciones residenciales de edificación?*
*Para ello, presenta a continuación el impacto que el sistema desarrollado ofrece en varios escenarios en relación con la contribución de la fachada solar y la reducción en el consumo del edificio. La principal conclusión es que la solución planteada representa una alternativa viable y competitiva a las tecnologías comparables y actualmente empleadas, tanto en la construcción de nuevos edificios, como en la rehabilitación de los existentes.*

# 1. INTRODUCCION

El desarrollo de la tesis en el transcurso de los cuatro capítulos anteriormente presentados ha consistido en un análisis progresivo en el que se ha ido estudiando, cuantificando y evaluando el potencial de los sistemas de fachadas solares térmicamente activas, soluciones que han sido diseñadas sobre un concepto basado en la tecnología de los paneles sándwich con acero.

El capítulo I ha estado enfocado al análisis de posibilidades y alternativas y, especialmente, a la identificación de la oportunidad y el potencial que un sistema como el propuesto tiene en el ámbito de las envolventes de edificación, así como en el sector de la rehabilitación energética de edificios.

El capítulo II ha servido para plantear la conceptualización del sistema de fachada activa desde una escala básica, valorando los elementos y materiales principales que componen el sistema. Esta aproximación ha permitido proponer como solución un diseño de panel de fachada concreto, pero, sobre este diseño que emplea paneles sándwich de acero, se han identificado los parámetros clave que, previsiblemente, tendrán una afección directa sobre el rendimiento del conjunto y, en consecuencia, influyen en la cantidad de energía que se puede obtener de la solución activa.

Tomando esos factores que permiten plantear diferentes variantes del diseño propuesto, en el siguiente capítulo III, se ha desarrollado un análisis paramétrico para cuantificar el efecto de estos factores, para poder así valorar la respuesta de posibles diseños alternativos. Esto ha permitido identificar el efecto que tienen las características principales de la solución, para lo que se ha establecido una diferenciación entre los parámetros de diseño, fijados una vez se concreta la solución en un panel concreto, y los parámetros dinámicos ambientales y de operación, que varían con el tiempo.

Para poder llevar a cabo este estudio paramétrico, se ha elaborado un modelo CFD que replica el comportamiento de la fachada solar, modelo que ha sido validado con datos obtenidos de forma experimental. Además, tomando en consideración estos datos experimentales y los resultados de la simulación, se han extraído los primeros resultados acerca del comportamiento de la fachada activa, pero ciñendo el estudio, en esta primera fase, únicamente a la fachada solar como componente principal del sistema.

Para valorar, elementos adicionales a la fachada solar que completan el conjunto, en el capítulo IV se ha analizado una aplicación real del sistema de fachada solar dentro de un circuito solar y acoplado a un sistema de producción. Este análisis ha sido posible gracias a una extensa campaña experimental, permitiendo valorar tanto la energía útil que se consigue gracias al sistema activo dentro de un circuito solar aislado, así como de la combinación de dicho circuito solar con una bomba de calor. Esta confrontación de los resultados para el sistema desacoplado, frente al sistema acoplado, ha proporcionado valiosos resultados, que permiten cuantificar la respuesta de ambas tecnologías cuando trabajan de forma conjunta. Se trata, por tanto, de un paso más en el nivel de comprensión y conocimiento del desarrollo llevado a cabo, demostrando que la energía que se obtiene a través de esta solución activa es muy significativa y que fluctúa en función de las condiciones de trabajo, consideración que se alinea con el estudio paramétrico del capítulo III.

Se puede, por tanto, concluir que, en los cuatro capítulos precedentes se ha ido siguiendo una progresión en la que, se ha ido ampliando la escala de análisis del sistema de la fachada activa sobre la que se desarrolla el estudio de la presente tesis. Se ha comenzado analizando y valorando la selección de los materiales y de los componentes básicos. A continuación, se ha estudiado el conjunto del panel de fachada activa que integra todos esos elementos a modo de colector solar, panel que, en la siguiente fase, es el elemento que recoge la energía solar y, mediante un circuito solar, acumula la energía térmica obtenida en un depósito de almacenamiento. La siguiente fase ha consistido en acoplar ese circuito solar a un sistema térmico completo con bomba de calor para producir agua caliente para consumo residencial.

Llegados a este punto, el último paso para concluir la progresión propuesta es analizar un sistema de producción como el planteado junto con el conjunto del edificio, describiendo así un análisis combinado en el que se pueda valorar el impacto de la fachada activa en una serie de escenarios de edificación alternativos. Cabe destacar que los resultados que se han ido obteniendo en todas esas fases previas están relacionados con las diferentes escalas del análisis: resultados para los materiales, para el panel, para el circuito solar y para el sistema de producción. La consideración de un sistema cuyas condiciones de contorno son las definidas por un edificio, permitirá valorar y cuantificar el impacto que la propuesta de fachada solar activa tiene en un sistema como este, expresado en ahorros energéticos ($kWh/m^2$), empleando una escala de medición que es la que habitualmente se emplea en el sector, y, de esta forma, se podrán hacer más comprensibles los beneficios que aportan las fachadas solares activas en el ámbito de la edificación.

El objetivo de este quinto y último capítulo de la tesis persigue plantear un estudio de estas características, con el que se pueda contextualizar los resultados principales y beneficios de la solución desarrollada. De esta forma se trasladarán las posibilidades y resultados esperados para el sistema cuando trabaja en diferentes condiciones de uso y, en definitiva, para demostrar el potencial de una solución de estas características. El resultado serán los potenciales beneficios que se pueden obtener con esta tecnología en términos de ahorro energético y económico, inversión, y aprovechamiento de fuentes renovables. El estudio se centrará en el impacto de la energía térmica obtenida por el conjunto activo, valorando su impacto en los consumos de calefacción y ACS así como la electricidad consumida por la bomba de calor, dejando de lado aspectos asociados al consumo de otros equipos sobre los que el sistema no tiene incidencia.

Para finalizar, el análisis planteado permitirá revisar los principales resultados obtenidos en los capítulos previos, permitiendo así destacar las conclusiones más relevantes obtenidas de todo el proceso. Se van a resumir y destacar los aspectos más relevantes de la investigación y análisis desarrollado para el sistema de fachada solar con paneles sándwich de acero, así como los posibles desarrollos y estudios que pueden plantearse en un futuro a través de potenciales líneas de investigación.

# 2. REVISIÓN DE LOS PRINCIPALES RESULTADOS OBTENIDOS EN LOS CAPITULOS PREVIOS

Con el fin de plantear el análisis de escenarios alternativos, se van a recopilar las principales conclusiones y resultados obtenidos en los análisis de los capítulos previos, tomando en consideración el enfoque y escala en cada caso. Se trata, concretamente, de repasar el proceso desarrollado en el transcurso de la tesis, en la que se ha analizado el comportamiento del sistema de fachada activa y, que se presenta de forma breve y resumida a continuación.

Al analizar el contexto se ha puesto de manifiesto la baja eficiencia energética del parque edificado, se ha destacado la oportunidad que ofrecen las fuentes renovables y los sistemas de aislamiento térmico para mejorar esta situación y, de forma específica, se han identificado las fachadas activas como una solución con un alto potencial para contribuir a mejorar la situación. Es decir, se ha constatado el pobre rendimiento energético de los edificios (expresado en consumo: $kWh/m^2$) y lo lejos que están todavía los edificios de alcanzar los objetivos establecidos para edificios de consumo nulo o casi nulo (NZEB) [291], [292]. La propuesta es desarrollar fachadas solares que, aplicadas en los edificios, permitan reducir las diferencias que se dan entre esas metas y la situación actual.

A continuación, el resto de la investigación llevada a cabo y que compone el núcleo del estudio desarrollado en esta tesis, ha estado enfocado al análisis del sistema activo de la fachada solar contemplando aspectos asociados al diseño y operación del sistema. Comenzando desde la escala más básica de la conceptualización de la solución, se han valorado y analizado materiales, elementos y dimensiones mínimas, para ir aumentando el enfoque hacia un sistema completo, primero en forma de panel y, luego, en forma de conjunto combinando el panel con una bomba de calor. Esta solución de sistema completo se ha propuesto para que pueda ser empleada en escenarios de edificación y de rehabilitación.

Esta progresión se puede resumir revisando los parámetros y unidades empleadas en cada etapa del estudio:

- Selección de materiales: Tal y como se ha tratado en los capítulos II y III, las propiedades de los materiales juegan un papel clave en el diseño de la solución. El análisis se ha centrado en los aspectos relacionados con las propiedades de estos como la **conductividad, densidad y absortividad**, expresados a escala básica.
- Diseño del panel: Una vez se ha optado por unos materiales y tecnologías de fabricación vinculadas a estos, se ha planteado el diseño del panel, descrito también en el segundo y tercer capítulo. Se trata de adoptar un enfoque en el que se pretende optimizar el conjunto en un producto concreto, el panel para la fachada solar, sobre el que se han analizado factores como las **dimensiones del panel, la forma y posición relativa del circuito hidráulico integrado, diámetro de conducto, superficie activa de paneles**, etc. Un aspecto importante a destacar es que una vez se concreta el diseño, estos parámetros ya no se van a modificar. La principal conclusión que se ha tomado de estas dos primeras fases ha sido la identificación de aquellos factores que tienen más impacto en la respuesta del sistema, lo que permite priorizar aquellos materiales y diseños que resultan de mayor interés para la aplicación propuesta.
- Configuración y modos de funcionamiento. Incorporando el panel de fachada solar en un circuito solar cerrado (combinando la fachada con un sistema de distribución y un

depósito de almacenamiento), se han analizado en los capítulos III y IV, parámetros que son variables, unos configurables y otros sujetos a las condiciones ambientales exteriores. Entre los aspectos a analizar están el **caudal, el tipo de fluido, radiación incidente o temperatura ambiente**. En este caso, la principal conclusión que se ha extraído ha sido la confirmación de la necesaria flexibilidad que debe tener el sistema para poder actuar sobre ciertos parámetros, de tal forma que permitan configurar adecuadamente el conjunto para adaptarse a las condiciones cambiantes que no son controlables.

- Operación del sistema de producción integrado. Cuando se añade el equipo de bomba de calor y resto de componentes complementarios, se consigue el sistema combinado que será el responsable de producir la cantidad de agua caliente requerida. En este caso y, tal y como se ha descrito en el capítulo IV, las condiciones de contorno del sistema se amplían considerablemente y se trabaja con cargas acopladas, **demandas, potencias de producción y rendimientos de cada subcomponente**. En este caso, el aspecto más destacable de la investigación desarrollada mediante una campaña experimental ha sido confirmar la relación que se da entre la respuesta de la fachada solar y la demanda requerida por las cargas. Además, se ha podido cuantificar esta relación mediante una ecuación calculada de forma experimental, que establece que el sistema se comporta mejor cuanto mayor y más continua sea la producción del conjunto, dejando así espacio a la fachada solar para captar cantidades mayores de energía.

Por tanto, tras analizar la progresión realizada, se ha alcanzado un nivel de conocimiento importante para el sistema de producción de calor combinado, para el que se puede estimar y valorar la respuesta y rendimiento.

Con el fin de completar la investigación iniciada resulta necesario contemplar un marco de análisis que considere el edificio y las condiciones de contorno de éste, de tal forma que los resultados del estudio puedan ser contrastados y equiparados a los valores de rendimiento y consumo de edificios que se han presentado en el capítulo I al plantear el desarrollo. Se trata, fundamentalmente, de concluir el estudio en una escala equiparable a la que se ha descrito al analizar el contexto, análisis que permitirá valorar las **implicaciones y beneficios en forma de ahorros energéticos** que se pueden obtener al aplicar una fachada solar como la desarrollada en diferentes escenarios.

Este estudio para el edificio es el que se va a desarrollar en este último y quinto capítulo de la tesis y que se va a describir en los apartados siguientes.

# 3. PLANTEAMIENTO DEL CASO DE ESTUDIO

Puesto que se ha constatado que el incremento en la producción y rendimiento de la fachada solar depende de que exista una demanda significativa, se plantea a continuación un estudio para el que resulta necesario cuantificar y definir una cierta demanda para una serie de escenarios alternativos, de tal forma, que se pueda analizar y comprender la contribución que implica la incorporación de una fachada solar acoplada a una bomba de calor.

Se plantea un enfoque simplificado con el objetivo de analizar, principalmente la respuesta del sistema activo trabajando de forma acoplada en un escenario de edificación. Pero como se requiere que el sistema de producción térmica acoplado a la bomba de calor esté funcionando también, además de para el edificio y para la fachada, se deberá plantear también un modelo de comportamiento para la bomba de calor.

Este enfoque simplificado implica un cierto nivel de incertidumbre en la definición de la demanda y del consumo final del edificio, asociado a una definición específica del escenario en cuanto a la descripción y tipología del edificio, pero no se considera un factor crítico para el estudio que se quiere plantear. Al fin y a al cabo, el resultado está vinculado a una demanda determinada, debido a que, tal y como se ha constatado, se da una relación entre ésta y el comportamiento del sistema activo que se quiere analizar, pero la forma en la que se obtiene dicha demanda es, hasta cierto punto, un factor de menor influencia en el cálculo que se quiere plantear a continuación.

El objetivo es, por tanto, estimar los ahorros que un sistema de fachada activa acoplado, como el propuesto, es capaz de proporcionar a diferentes niveles de demanda vinculados a escenarios alternativos. Se trata de analizar hasta qué punto el sistema debe considerarse como una alternativa eficiente y competitiva para considerar en los edificios de energía baja, nula o positiva [293].

De esta forma, se adopta un enfoque en el que se define la demanda del sistema primero, y luego se analiza el aporte y la contribución solar de la fachada solar, así como el consumo asociado a la bomba de calor, buscando en todo el proceso, maximizar la contribución de estas fuentes renovables a la vez que se reduce el consumo de energía no renovable.

En los siguientes apartados se va a describir la aproximación adoptada para estimar y valorar cada uno de esos factores principales: la demanda, la contribución de la fachada solar y el consumo del conjunto del sistema.

De esta forma se pretende dar respuesta a la pregunta principal que guía el análisis que se presenta en este último capítulo: ¿Qué cantidad de la energía consumida podemos cubrir con el sistema solar para que el sistema sea más sostenible?

La unidad de medida de estudio planteada, tal y como se va a ir describiendo a continuación será una vivienda de uso residencial, que se representa a través de las condiciones que definen el entorno en el que se ubica: el edificio. Dado el interés que el sistema estudiado puede tener en otro tipo de aplicaciones, en el siguiente apartado 4 se estudiarán escenarios alternativos a este caso de referencia.

## 3.1. Definición de la demanda

Para definir la demanda completa se contemplan las dos cargas térmicas principales del sistema analizado: demanda de calefacción y demanda para Agua Caliente Sanitaria (ACS). Se hará una estimación mediante la ecuación de balance de energía considerando las ganancias y pérdidas que se dan en el edificio [294]. La Figura 125 ilustra gráficamente en un diagrama de Sankey los fenómenos principales a considerar para establecer el equilibrio térmico.

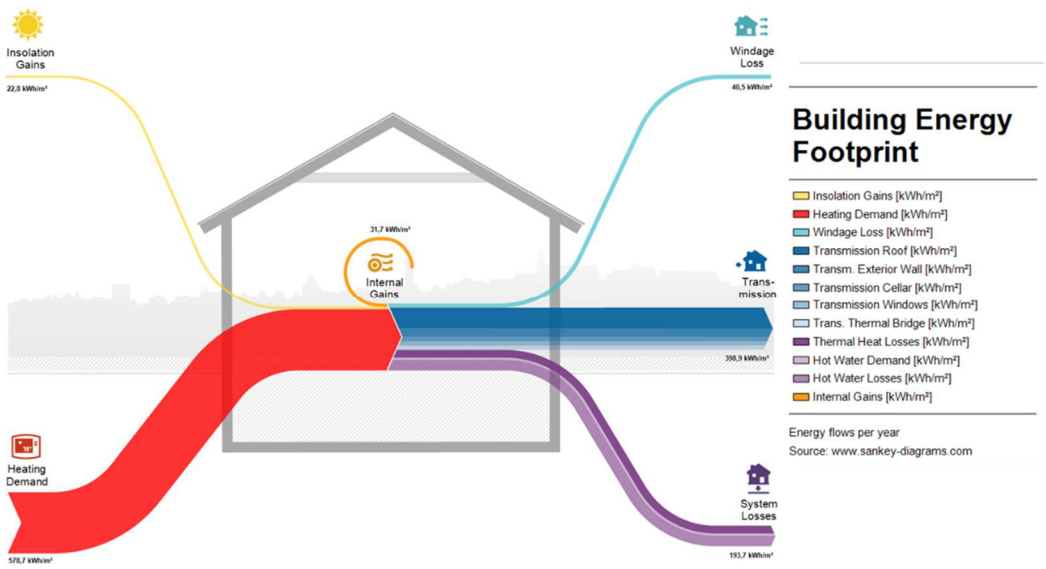



**Figura 125. Balance energético en un edificio contemplando ganancias, pérdidas y aporte del sistema de producción de calor. Representación del diagrama de Sankey. [295]**

Los factores representativos, en cuanto al balance energético a estudiar serán:

- La energía que entra en el sistema son las ganancias. En edificios residenciales las ganancias principales suelen ser las ganancias solares; la energía que se transfiere a través de la envolvente (fachada y cubierta), principalmente a través de las superficies acristaladas, y que varía durante las diferentes estaciones del año. Las otras ganancias a considerar son las internas que se generan dentro de los edificios debidas al uso de electrodomésticos y equipos que, de alguna forma, generan calor (ordenadores, iluminación, cocina…) así como al calor metabólico emitido por los usuarios del edificio.
- La energía que sale del sistema se representa en forma de pérdidas. Las pérdidas principales se dan también por conducción a través de la envolvente (muros, cubierta, forjado inferior, ventanas y puentes térmicos) y serán mayores cuanto peor sea el nivel de aislamiento de estos componentes. Asociados a la ventilación del edificio, se dan también una serie de pérdidas energéticas debidas a los procesos de renovación del aire (ventilación controlada) y a las infiltraciones (ventilación no controlada). Finalmente, se dan una serie de pérdidas vinculadas al rendimiento de los equipos y sistemas térmicos (calefacción y ACS en este caso), sistemas que tienen una serie de pérdidas en los procesos de generación, distribución y acumulación de la energía producida.

- La diferencia para obtener el equilibrio térmico del sistema lo deberán aportar estos equipos de producción de calor para:
    - Mantener la temperatura interna en un valor de consigna determinado como temperatura interior. Esto implica unos valores altos de producción de agua caliente para calefacción en invierno y bajos o nulos en otras épocas del año, especialmente en verano.
    - En paralelo, se dará una producción de ACS para cubrir las necesidades diarias, producción que se mantiene dentro de un patrón muy regular a lo largo de todo el año.

En los siguientes apartados 3.1.1 y 3.1.2 se va a describir la forma en la que se van a considerar estos dos términos principales de demanda: para ACS y para calefacción respectivamente. En ambos casos se estimará una demanda de agua caliente diaria, definida para cada día del año, que resulta de sumar ambos términos una vez se calculan cada uno de forma individual.

A continuación, en el apartado 3.2 se va a describir la forma de cubrir esa demanda mediante los sistemas térmicos para obtener el equilibrio térmico descrito. En este caso concreto, se pretende alcanzar una elevada contribución del sistema solar para reducir el consumo de combustibles fósiles.

En este punto, cabe destacar, la influencia del tipo de carga al que se quiere aplicar el sistema. Tal y como se va a detallar en los siguientes apartados, se dan ciertas diferencias entre las demandas de ACS y calefacción. La más importante es la estacionalidad e influencia del clima que afecta en gran medida a la segunda y que hace más difícil dimensionar los sistemas para cubrir las condiciones más desfavorables.

Por otro lado, la demanda de ACS está asociada a los patrones de uso y, además, no es la principal en los casos de aplicación residencial habituales: según el IDAE el 47,0% del consumo de los edificios residenciales se destina a calefacción frente al 18,9% que se emplea para ACS [296]. Sin embargo, resulta ser una carga más previsible y acotada que la de calefacción. Estos aspectos, con un perfil más estable y sencillo de gestionar, son los que hacen de la demanda de ACS la más interesante para una solución de generación energética basada en renovables, como el sistema de fachada solar propuesto, con una producción solar que también depende de las condiciones climáticas.

Por tanto, el planteamiento del análisis descrito a continuación buscará priorizar el consumo de la energía obtenida y destinarla a ACS, buscando así el máximo aprovechamiento del sistema solar, y cuando haya posibilidad de obtener más energía, el excedente se destinará a cubrir las necesidades de calefacción. Con el fin de complementar esta aproximación, se van a valorar también escenarios alternativos con diferentes niveles de potencia requerida para ACS como carga única.

De esta forma, se va a plantear el cálculo diario de la demanda para el escenario propuesto, demanda que resulta de calcular de forma independiente las necesidades para ACS y climatización, según lo descrito en los siguientes apartados.

### 3.1.1. Demanda de ACS

Tal y como se ha indicado, la demanda de ACS se puede considerar bastante constante y predecible en las aplicaciones de tipo residencial.

Para estimar la demanda de ACS se va a adoptar el método propuesto por el Documento Básico de Ahorro de Energía, DB-HE del CTE [297] en el que, para el caso residencial, se establece una cantidad de 28 litros/día de agua caliente por persona a 60 °C de temperatura (Anejo F del DB-HE).

Se definen, también, diferentes temperaturas de suministro del agua por mes, en función de la localización (Anejo G del DB-HE), lo que determinará la energía requerida para alcanzar el valor objetivo de 60 °C. Para el caso de Bilbao, que es la ubicación que se va a tomar como referencia, esto implica un total de 561,3 kWh por persona y año.

Para localizaciones alternativas, tomando en consideración los criterios establecidos en el CTE y la información de 12 capitales de provincia españolas, se puede establecer una correlación entre la cantidad de energía demandada para ACS y la temperatura exterior media anual. La relación lineal entre ambos factores es la que se indica en la siguiente Figura 126.

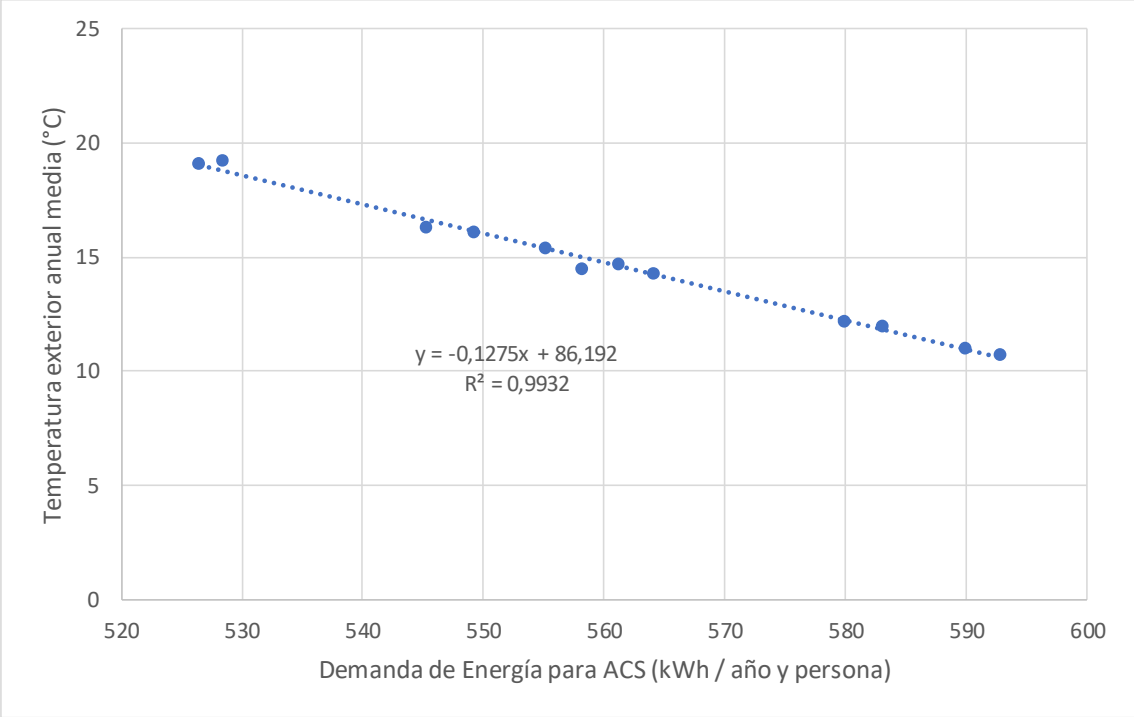



**Figura 126. Correlación entre demanda anual de ACS y temperatura exterior media**

Asimismo, para temperaturas diferentes a 60 °C, se proporciona una regla para modificar la cantidad de agua que resulte en la misma cantidad de energía consumida y, para otros usos diferentes al residencial, el valor de 28 litros/día persona varía en función del uso del edificio considerado (Tabla C del Anejo F del DB-HE). Finalmente se aplican coeficientes de simultaneidad en edificación residencial colectiva, definidos como factor de centralización, en los que se considera un mayor aprovechamiento energético.

Por otro lado, el mismo DB-HE en el apartado 4 establece una contribución solar mínima para cubrir la demanda de agua caliente sanitaria. Este enfoque, está alineado con el razonamiento que se ha indicado anteriormente, en el que se favorece el aprovechamiento este tipo de cargas estables en el tiempo con fuentes de generación menos predecibles y sujetas a las condiciones climáticas. De esta forma, se consigue sacar el máximo partido de esa energía renovable en el momento en el que se produce.

Según se indica en el DB-HE4, *"La contribución mínima de energía procedente de fuentes renovables cubrirá al menos el 70 % de la demanda energética anual para ACS*" y "*esta contribución mínima podrá reducirse al 60 % cuando la demanda de ACS sea inferior a 5.000 l/d*". Asimismo, destaca que "*Se considerará únicamente la aportación renovable de la energía con origen in situ o en las proximidades del edificio*".

Por tanto, para estimar la demanda de ACS se va a emplear este método, tomando en consideración que la demanda varía para cada mes del año, debido a los cambios en la temperatura de suministro cada mes. Tal y como se ha descrito, los factores principales que afectan a este dimensionamiento serán el uso y tipo del edificio, número de ocupantes y la localización y el resultado será la definición de la demanda en una resolución diaria.

### 3.1.2. Demanda de calefacción

Los fenómenos que afectan a la demanda de calefacción resultan ser más complejos que aquellos que afectan a las necesidades de ACS, porque se combinan múltiples factores relacionados con el tipo edificio, elementos constructivos, usuarios, localización etc. Uno de los aspectos más destacables y diferenciadores respecto de lo comentado en el apartado previo, son las grandes diferencias que se aprecian al cabo del año con el cambio de las condiciones exteriores el transcurso de las estaciones del año.

El balance energético entre ganancias y pérdidas determinará la necesidad de introducir o extraer energía del sistema para mantener el equilibrio, dando lugar a la producción de calefacción en los meses fríos y de refrigeración en verano. Esto también representa un elemento diferenciador frente al caso del ACS, que siempre implica producción de agua caliente durante todo el año.

Así, en invierno se darán los días de déficit de calor en los que se requiere el aporte de la calefacción, por lo que se deberá proporcionar la energía adicional requerida para mantener el interior del edificio por encima de una temperatura mínima de consigna. En verano, por el contrario, se da un exceso de calor dentro del edificio y, de forma análoga al caso anterior, se buscará mantener las condiciones interiores por debajo de un valor máximo de temperatura mediante sistemas de climatización. En épocas intermedias se pueden dar situaciones de equilibrio térmico en los que no resulta necesario ni calefactar ni refrigerar.

En este caso y, dadas las características del sistema desarrollado, se va a plantear el estudio basado en el análisis del balance energético y del aporte de energía requerido para los casos de producción de agua caliente. Es decir, un escenario en el que la calefacción es el sistema predominante y para el que se considerará el aporte solar. De esta forma, se podrá dimensionar la demanda y, mediante un análisis posterior, se determinará la contribución del sistema de fachada solar a dicha demanda.

Para ello se considerarán las siguientes expresiones, basadas en [298] y [299]:

$$Dem = Gan - Per \tag{45}$$

$$D = g\,I + Gan_{int} - H\,(T_{room} - T_{amb}) \tag{46}$$

Siendo Dem, Gan y Per, la demanda, las ganancias y pérdidas respectivamente en la ecuación (6). En la segunda ecuación, (7), las ganancias se dividen en dos fatores: las solares y las internas.

Las ganancias solares a través de los huecos vienen determinadas por el factor g I, siendo I la radiación global incidente dependiente de la superficie y la orientación y g, el factor solar. El segundo término representa las ganancias internas ($Gan_{int}$) que se generan por los ocupantes del edificio, así como por los equipos y aparatos eléctricos dentro del mismo. Finalmente, el tercer término expresa las pérdidas en función del factor de pérdida de calor (H) y de la diferencia de temperatura entre el interior ($T_{room}$) y el exterior ($T_{amb}$).

Por tanto, según el enfoque planteado, los factores principales para determinar la demanda serán H y g (dependientes del edificio y sus componentes) $Gan_{int}$ y $T_{room}$ (dependen del uso del edificio) y $T_{amb}$ e I que dependen de las condiciones exteriores y de la ubicación.

A la hora de valorar la demanda de calefacción, un parámetro que se considera y que representa el efecto dinámico asociado a la inercia térmica es el factor de la capacidad Térmica (C). La inercia térmica de un edificio determina su capacidad para almacenar la energía térmica y esto, a su vez, puede tener una influencia directa sobre las temperaturas interiores del edificio y la demanda de energía para alcanzar las condiciones interiores de confort.

Al vincular este componente a las variaciones de temperatura, considerando una ecuación derivada de la temperatura interior respecto del tiempo ($C\,dT_{room}/dt$) [299], se puede incorporar el efecto dinámico de la inercia al conjunto. Asimismo, se deberían considerar también estos efectos en la transmitancia térmica (U) de los componentes por la variación en el flujo de calor, adoptando, por tanto, valores de transmitancia térmica dinámicos y variables [300].

El impacto de la inercia térmica ha dado lugar a numerosos estudios. También el efecto de la inercia de la envolvente [301], y, en general, está aceptado que es un factor que tiene impacto en el comportamiento y consumo energético de los edificios. Por ejemplo, de acuerdo con Reilly y Kinnane [302], para climas cálidos donde predomina la producción de frío cuando se dan variaciones de temperatura significativas, pero no excesivas, durante el mismo día y una ocupación intermitente del edificio, se pueden demostrar ahorros en el consumo. Sin embargo, esta ventaja no resulta tan evidente cuando se trata de un escenario en el que predomina la demanda de calefacción.

De acuerdo con el estudio desarrollado por Verbeke & Audenaert [303], el efecto de la inercia térmica tiene un impacto muy inferior en la demanda energética, si se compara con el aislamiento térmico y el factor de ganancia solar.

Como en el estudio propuesto en este caso se van a considerar especialmente escenarios de producción de calor, en los que predomina la calefacción, la consideración del término que

describe la inercia térmica resulta ser menos relevante y no se va a incorporar este término al cálculo.

Sin embargo, con el fin de adoptar de alguna forma el efecto de la inercia sin que sea necesario incorporar la ecuación derivada y se pueda plantear un cálculo estacionario, se plantea una estimación indirecta adaptando el valor interior de temperatura en cada época del año[304], diferenciando el efecto mayor o menor de este factor según las condiciones de cada mes [305].

Por tanto, para representar el caso de estudio presentado y calcular la demanda requerida para calefactar el edificio, se deberán estimar los valores de H, g y $Gan_{int}$. El valor $T_{room}$ se definirá como valor objetivo y $T_{amb}$ e I, serán datos climáticos asociados a la ubicación.

$Gan_{int}$ será un valor diario constante en función del número de personas, la ocupación y el equipamiento disponible dentro del edificio que contribuye a las ganancias internas.

Para el caso específico de H y g, se presenta a continuación la forma en la que se estiman ambos factores.

***H – Factor de pérdida de calor***

El factor de pérdida de calor del edificio (expresado en de W / K) considera los fenómenos de transmisión y de convección. En la transmisión se contempla la pérdida de calor a través de las diferentes superficies y planos que componen la envolvente del edificio (fachada, cubierta, forjado y ventanas), caracterizada por sus valores U, valores que se combinan con el efecto de los puentes térmicos que representar una merma del aislamiento que proporcionan esas superficies de la envolvente, por lo que se añade a la expresión un coeficiente de incremento de U que represente los puentes térmicos.

Para la convección se contempla el intercambio de calor por ventilación y renovaciones de aire (sistema de ventilación controlado), así como por el efecto de las infiltraciones (no controladas).

La ecuación (47) muestra cómo se calcula H en función de los dos factores por conducción (ecuaciones (48) y (49)) y un factor por convección (ecuación (50)).

$$H = H_{Conducción} + H_{Ptes\ Term} + H_{Convección} \tag{47}$$

$$H_{Conducción} = U_{Fac} \cdot A_{Fac} + U_{Cub} \cdot A_{Cub} + U_{For} \cdot A_{For} + U_{Ven} \cdot A_{Ven} \tag{48}$$

$$H_{Ptes\ Term} = \Delta U_{Puentes\ Térmicos} \cdot (A_{Fac} + A_{Cub} + A_{For} + A_{Ven}) \tag{49}$$

$$H_{Convección} = (N_{Vent} + N_{Inf}) \cdot V_{Aire} \cdot \rho_{Aire} \cdot Cp_{Aire} \tag{50}$$

Los valores de aislamiento (U) por superficie (A) de cada componente de la envolvente se expresan en la ecuación (48), y, en la ecuación (49), se adopta un coeficiente simplificado (ΔU) que representa, de forma ponderada, el impacto promediado de todos los puentes térmicos en la envolvente del edificio. En general puede considerarse ΔU = 0,10 W/m²K como un valor promedio del factor de puentes térmicos y, para un caso en el que se minimiza este efecto, el término puede reducirse a la mitad.

En la ecuación (50), se combinan los valores de renovación de aire por ventilación e infiltraciones ($N_{Vent}$ y $N_{Inf}$) con el volumen de aire interior, la densidad y el calor específico del aire, para expresar el efecto de pérdidas de calor por convención.

***g – Factor de ganancias solares***

El factor de ganancias solares (en unidades de m²) representa la superficie efectiva del edificio que recibe la radiación solar y que es aprovechada en forma de ganancia. Por tanto, de acuerdo con la ecuación (51) se calcula el factor de ganancia solar para cada una de las orientaciones de la envolvente en función de la orientación de las fachadas. El factor g I será función del tiempo y de la radiación incidente en cada plano de fachada en cada momento (ecuación (52)), con una radiación directa instantánea que alcanza, como mucho, dos orientaciones a la vez.

$$g_{S/E/O/N} = g_{Ven} \cdot A_{Ven,\ S/E/O/N} \cdot F_{Marco} \tag{51}$$

$$g \cdot I(t) = g_S \cdot I_S(t) + g_E \cdot I_E(t) + g_O \cdot I_O(t) + g_N \cdot I_N(t) \tag{52}$$

En este caso se va a suponer una orientación del edificio completamente alineada con los puntos cardinales. Para el cálculo de cada factor g en cada orientación, por ejemplo, $g_S$ al sur, se considerará la superficie de huecos correspondiente a ese plano, siendo $A_{Ven,S}$ en este caso.

$F_{Marco}$ es el factor de marco que establece la relación entre el área vidriada y el y el área ocupada por la ventana completa. Para simplificar y, tomando en consideración valores habituales de este parámetro se asume un valor $F_{Marco}$ = 0,7.

El factor $g_{Ven}$ es el factor solar de la ventana, que representa, de forma porcentual, la cantidad de radiación que pasa al edificio a través de la ventana [306]. Aunque es un factor que podría considerarse independiente del valor del aislamiento proporcionado por la ventana (representado por su valor de U), lo cierto es que se puede aproximar una relación entre ambos términos. Si se toma en consideración una serie de sistemas alternativos en los que se aprecia la evolución de las soluciones de ventanas, así como los sistemas con niveles de aislamiento diferentes que existen en el mercado, se obtiene la ecuación (9) que describe la relación entre el factor $g_{Ven}$ y el aislamiento proporcionado por la ventana, $U_{Ven}$.

$$g_{Ven} = (0{,}125\ U_{Ven})^{0{,}25} \tag{53}$$

Por tanto, la demanda diaria de calefacción se establecerá mediante el cálculo de los factores indicados. Se planteará un cálculo horario para determinar el equilibrio térmico de acuerdo con la ecuación (7) y el cómputo de todas las horas determinará la demanda diaria de calefacción. Se adopta un análisis con una curva de demanda en saltos horarios para simplificar el cálculo y, también, porque el beneficio que aportaría un cálculo con periodos más cortos tampoco implica grandes diferencias en el resultado [307].

Puesto que se busca analizar el caso de calefacción, únicamente se computarán aquellos valores de demanda positivos y los negativos, asociados a la refrigeración, no se tendrán en consideración en este estudio que está orientado a escenarios con demandas significativas de calor. En caso de ser de interés, se pueden considerar escenarios con una demanda significativa de refrigeración, computando la demanda de calefacción empleando el mismo método descrito,

pero para estos, el sistema de fachada activo únicamente aportará calor para el caso de la producción de agua caliente sin que implique ningún beneficio para la producción de frío.

## 3.2. Definición de la producción de calor y de la contribución de la fachada solar. Estimación del consumo del edificio

Una vez se cuenta con una demanda dimensionada, en la que se han combinado las necesidades de ACS y de calefacción, el siguiente paso es suministrar al conjunto la energía requerida por esa demanda, para lo que se debe contar con un equipo de producción de calor.

Dependiendo de las características de los equipos de producción, se cubrirá esa demanda con un único equipo, o con varios dispuestos en paralelo como fuentes alternativas de producción.

Cuando, como en el caso actual, el sistema se basa en fuentes de energía renovables, lo habitual es contar con al menos dos sistemas de producción puesto que cubrir el 100% de la demanda únicamente con tecnología renovable resulta, en general, una aproximación poco eficiente. Esto se debe, en parte, al sobrecoste de estas soluciones, pero, especialmente, asociado a la intermitencia y dependencia de las condiciones climáticas que afectan a la producción solar y que, como consecuencia, requerirían un importante sobredimensionamiento del sistema para garantizar el suministro durante todo el año y en las condiciones más adversas. Además, un diseño con una instalación sobredimensionada implicaría, en muchos periodos, producciones que sobrepasan en gran medida la demanda, por lo que resultarían necesarios diseños y enfoques para gestionar convenientemente esa sobreproducción para no desaprovechar toda esa energía. En el caso de los paneles fotovoltaicos la electricidad excedente se puede inyectar en la red, pero, cuando se trata de energía térmica, y, salvo que se cuente con una red de distrito análoga al caso eléctrico, la gestión del calor excedente puede suponer un derroche energético innecesario.

En este caso, como el análisis se centra en las fachadas solares, el escenario que se va a plantear es el de un sistema combinado de fachada activa con otro equipo de producción. Se perseguirá que una parte de la demanda, la máxima posible, sea cubierta por el sistema de fachada activa y el resto, hasta alcanzar toda la demanda, se pueda cubrir con equipos complementarios para alcanzar así los picos máximos en los momentos requeridos.

El sistema contemplado es un Sistema de Bomba Calor con Contribución Solar (SAHP por sus siglas en inglés), con conexión indirecta de la fachada solar al evaporador de la bomba de calor. Es el mismo sistema sobre el que se ha desarrollado la experimentación presentada en el capítulo IV. Debido a la configuración planteada, toda la energía de la fachada solar pasa por la bomba de calor por lo que, en esencia, el sistema renovable es el conjunto fachada solar + bomba de calor.

Cuando el equipo de producción principal no alcanza para cubrir la demanda requerida, lo habitual es contar con un sistema de respaldo para cubrir los picos de producción en condiciones desfavorables, como, por ejemplo, una caldera a gas o un calentador por resistencia eléctrica. El caso de resistencias de inmersión es una solución ampliamente empleada en equipos con bombas de calor, cuyo fin es cubrir la demanda en aquellos días en los que el equipo no alcanza la potencia suficiente. En el estudio planteado se considerará esta solución por resistencias como solución de respaldo.

Asimismo, cabe destacar que, tal y como se ha indicado en el capítulo I, cuando los valores de COP de la bomba de calor superan un cierto nivel (valor de rendimiento medio estacional (SCOPdhw) superior a 2,5 según se describe en el DB-HE4 del CTE [297]) se puede considerar que la bomba de calor accionada con electricidad contribuye como una fuente renovable más.

En este caso, la energía que se va a cuantificar como "renovable" será únicamente aquella captada por la fachada solar y, desde un punto de vista conservador, se va a clasificar toda la electricidad consumida por la bomba de calor y demás componen entes del sistema como "energía no renovable".

En cuanto a la configuración del sistema propuesto, aunque cabría considerar otras alternativas como un *bypass* de la bomba de calor en este sistema indirecto, o una conexión directa actuando la fachada solar como evaporador, el sistema principal de producción que se va a considerar será aquel sobre el que se ha desarrollado la experimentación descrita en el capítulo anterior y, para el que se han obtenido los resultados de caracterización del conjunto. Se considera que los resultados proporcionados son representativos de la capacidad y potencial del sistema de fachada activa desarrollado y que, en cualquier caso, se pueden analizar configuraciones alternativas como las identificadas para desarrollar en estudios futuros, pero para los que resultan necesarias caracterizaciones similares. De esta forma y, tomando en consideración los resultados del Capítulo IV, se podrá estimar, de una forma bastante directa, tanto la producción de la fachada solar como el rendimiento medio de la bomba de calor.

Para calcular el rendimiento y producción de la fachada activa, se considera la demanda estimada y la radiación incidente en el plano vertical.

En el caso de la bomba de calor, el comportamiento de esta se puede describir de forma simplificada a través de unos valores de COP estacionales promedio.

Como conclusión, en el caso de estudio simplificado propuesto, el proceso para definir la producción del sistema combinado se desarrollará siguiendo los siguientes pasos:

- Tomando la demanda diaria de calor requerida y calculada según lo descrito en apartado 3.1 previo, se estima el rendimiento de la fachada activa para ese día concreto. Para calcular la producción de la fachada activa se combina la demanda con la radiación solar disponible en el plano de fachada. Para ello se tiene en cuenta la energía final que se debe generar para cubrir la demanda (asumiendo unas pérdidas en la distribución). Los factores que se han calculado experimentalmente y que se resumen en la Tabla 42 y la ecuación (54) permiten cuantificar el rendimiento de la fachada solar diario.

$$\eta_{FS-HP} = A\,(Q_{Sol})^{B} \quad (54)$$

| Energía diaria producida | Factor A | Factor B |
|---|---|---|
| 3,4 – 8,6 kWh | 0,4352 | -0,958 |
| 10,7 – 19,2 kWh | 0,5459 | -0,923 |
| 20,9 – 26,33 kWh | 0,6695 | -0,825 |
| 26,4 – 39,9 kWh | 1,2009 | -0,813 |
| 40,1 – 44,7 kWh | 1,5024 | -0,81 |
| 45,0 – 51,03 kWh | 1,5934 | -0,762 |

**Tabla 42. Factores de la ecuación (44) obtenida experimentalmente relacionando radiación incidente en el plano y rendimiento de la fachada activa**

- El rendimiento determinará también la producción solar diaria que se consigue con la fachada activa.
- Por otro lado, los valores de COP promedio calculados servirán para establecer los rangos entre los que se puede encontrar el rendimiento del sistema completo con bomba de calor. Dependiendo del tipo de demanda predominante para ese día en concreto; ACS, Combinada (ACS/Calefacción) o Calefacción, se tomarán los valores COP descritos en la Tabla 38 y que también son resultado de la caracterización experimental.
- En la Tabla 38 se distinguen dos rangos para establecer el valor COP del sistema: uno máximo y otro mínimo. El mínimo es el del caso que se ha monitorizado y en el que, tal y como se ha descrito en el capítulo IV, el sistema de distribución por aire ha penalizado el rendimiento del conjunto, tanto por la configuración planteada, como por el consumo eléctrico requerido para las baterías de intercambio aire – agua.
  El valor máximo de COP será el que se ha cuantificado en la experimentación como el máximo alcanzable por el conjunto en el que se reduce el consumo eléctrico al mínimo. Para obtener estos valores de rendimiento se requiere una revisión y mejora en un desarrollo más allá del presente estudio, pero que, en cualquier caso, se considera un objetivo alcanzable, de acuerdo con la bibliografía consultada [308] – [312].

| | $COP_{ACS}$ | $COP_{CALEF.}$ | $COP_{COMB.}$ |
|---|---|---|---|
| $COP_{MAX}$ del sistema SAHP | 4,00 | 4,03 | 4,07 |
| $COP_{min}$ del sistema SAHP | 2,98 | 1,69 | 2,24 |

**Tabla 43. Valores de COP máximo y mínimo considerados para el estudio propuesto**

- Tomando en consideración la demanda y el COP se puede establecer el consumo diario de electricidad del equipo. Asimismo, se estimará la potencia máxima diaria requerida en cada hora y se analizará si excede de la máxima capacidad del equipo y si debe activarse el sistema de respaldo. En caso de que así sea, se tendrá en cuenta también el exceso de energía requerida para cubrir esos picos de demanda.

De forma resumida y tomando en consideración que el enfoque general planteado es el de maximizar la producción solar y reducir el consumo de electricidad, se plantea el cálculo de la producción diaria, tomando como punto de partida la demanda calculada. De esta forma, en el análisis se plantea de forma secuencial la estimación para los tres componentes planteados en el sistema:

- En primer lugar, la producción de la fachada solar. Se estima el rendimiento y energía captada por la fachada. Esta producción permitirá también calcular la fracción solar, entendida como la relación entre la energía captada por el colector y la demanda.
- A continuación, se estudia la producción de la bomba de calor acoplada a la fachada. Se consideran los COPs medios del sistema en función de la demanda y con éstos se calcula el consumo eléctrico. Asimismo, se analiza si se supera la potencia máxima.
- En los días en los que se excede del máximo de potencia, se considera el equipo de respaldo. De esta forma se contempla la energía no cubierta con el sistema de producción principal.

En términos generales los factores que influyen en el sistema de producción y en el consumo eléctrico asociado son:

- La capacidad del sistema de producción principal, contemplando fachada activa y bomba de calor. Esto implica una superficie de fachada activa a modo de colector para la primera y una potencia máxima de producción de agua caliente para la segunda.
- El tamaño de la carga que genera la demanda (distinguiendo entre ACS y calefacción) y el momento en el que se producen.
- El rendimiento de ambos equipos.
    - Para la fachada activa dependerá de la radiación incidente (depende de la localización y la orientación) y de la demanda diaria.
    - Para la bomba de calor se contemplan dos escenarios para el límite superior e inferior de rendimiento expresado mediante el COP promedio estacional.

### 3.2.1. Consideraciones sobre la bomba de calor

Resulta relevante contextualizar el papel de la bomba de calor y la forma en la que se está teniendo en consideración en el estudio que se está planteando. La bomba de calor resulta ser un componente muy importante del sistema propuesto y, tal y como han indicado varios autores [308], [311], [313] y se ha demostrado en el capítulo IV, es un equipo que combinado con la fachada solar permite mejorar sustancialmente la respuesta del conjunto.

Por tanto y, aunque el foco y el interés principal en este caso está en el análisis de la fachada solar, la respuesta de la bomba de calor influye de forma significativa en el resultado del estudio debido a la relación que guardan ambos componentes.

El estudio del comportamiento de la bomba de calor es un área de investigación que se ha considerado parcialmente en la experimentación desarrollada, pero sin llegar a un nivel de detalle elevado. No obstante, los datos promedio obtenidos experimentalmente para el COP de

la bomba en los diferentes regímenes de uso (ACS, Calefacción y combinado) permiten realizar unos cálculos simplificados diarios basados en estos datos estimados. Sí que es importante destacar que los resultados obtenidos están asociados a la experimentación desarrollada y que se da cierta incertidumbre acerca de los valores que se obtendrían en otras condiciones de funcionamiento que sean muy diferentes (tamaño y sincronización de la carga, condiciones ambientales…), tal y como se desprende de estudios similares asociados a la ubicación, [314], [315], o a condiciones diferentes de funcionamiento [312], [316].

A pesar de que la bomba de calor es un componente sofisticado, en este caso se está representando de forma simplificada y con valores promediados que se consideran adecuados para el estudio que se quiere desarrollar. Además, se ha tomado una propuesta de valores máximos y mínimos de COP que permite acotar la respuesta del sistema entre esos dos extremos.

Sí que merece la pena destacar que cabe la posibilidad de plantear un desarrollo y representación más detallados con los que profundizar en una modelización más específica. Esto permitiría valorar la respuesta de la bomba en función de varios factores como son las temperaturas de impulsión y retorno en ambos focos, temperaturas y estratificación en el depósito, frecuencia del compresor, condiciones ambientales…. Pero el alcance de un estudio de estas características, en el que se caracterizaría de forma pormenorizada la bomba de calor acoplada a la fachada solar y en el que habría que considerar todos esos parámetros de diseño de este subcomponente, excede del ámbito de esta tesis, en la que se quiere plantear el foco del análisis en la solución constructiva de la fachada solar, e implica un nivel de detalle que no se corresponde con el enfoque propuesto.

No obstante, sí que se identifica como una línea de investigación de interés a futuro, planteando un estudio con el que profundizar en el comportamiento de los diferentes componentes del sistema, haciendo hincapié en la bomba de calor como elemento clave, de tal forma que se puedan modelizar estos sistemas combinados con mayor precisión.

## 3.3. Selección de un caso de referencia sobre el que plantear escenarios alternativos

Tal y como se ha descrito en los dos apartados anteriores, se ha definido un método con el que estimar, de forma simplificada, la demanda de una vivienda en el entorno de un edificio. A continuación, se ha definido la forma con la que estimar la producción de calor que cubra esa demanda, teniendo en cuenta la contribución de la fachada solar. El siguiente paso será contextualizar el caso de estudio en un escenario de edificación, en el que se instala el sistema de fachada activa, destacando los parámetros principales que describen dicho escenario.

En este caso se buscará definir un escenario que sea cercano al caso monitorizado en KUBIK®, para el que se cuenta con una información más completa y contrastada. Una vez analizado ese caso de referencia, se plantearán a continuación escenarios alternativos tal y como se va a comentar en el próximo apartado 4.

Por tanto, se tomará como punto de partida y unidad de análisis una vivienda individual en el entorno de Euskadi, clima de Bilbao (como el de KUBIK®), adoptando dos enfoques: una vivienda

dentro de un edificio de vivienda colectiva y una vivienda unifamiliar. La superficie de fachada activa serán los 18 $m^2$ de panel utilizados en la experimentación.

Para definir las dos viviendas del caso de referencia se tomarán en consideración, principalmente, dos fuentes de información: El Ente Vasco de la Energía (EVE) [317] y el Instituto para la Diversificación y ahorro de la Energía (IDAE) [318]. Ambos organismos definieron las características principales de las viviendas de Euskadi [319] y España [296] respectivamente describiendo los factores más característicos en cada caso. De forma complementaria, el *EU Building Stock Observatory* (BSO) [320] proporciona algunos datos estadísticos adicionales.

Los aspectos principales considerados para definir el escenario de referencia son los siguientes:

- Tamaño y antigüedad de la vivienda. El EVE indica un parque principalmente urbano y costero en Euskadi con viviendas de 87 $m^2$ y 39 años de antigüedad media. Para el caso de España el BSO diferencia 111 $m^2$ para viviendas unifamiliares y 86 $m^2$ para vivienda colectiva, destacando que el 80 % de las viviendas de España se construyeron entre los años 1945 y 2010.
- El IDAE destaca que el 74% de las viviendas de España en la zona Atlántica, en la que se enmarca el caso de referencia, están en bloques de viviendas.
- Las principales características que definen los sistemas constructivos de los edificios españoles están caracterizadas por el BSO en función del año de construcción.
- Basado en esas mismas fuentes del BSO, se ha desarrollado también un estudio del potencial de integración de los sistemas solares en fachadas [321], que permite orientar convenientemente la incorporación de la fachada solar al edificio.
- De promedio en las viviendas hay 2,5 ocupantes en España y 2,6 en Euskadi. En este caso cabe considerar el efecto de las segundas viviendas y las viviendas no ocupadas, por lo que se va a asumir una media algo superior.
- El gas natural se ha ido introduciendo progresivamente en el consumo doméstico de Euskadi hasta llegar a ser el principal combustible utilizado.
- En cuanto al consumo de las viviendas, el EVE diferencia un consumo medio anual de electricidad y gas natural por vivienda en Euskadi de 3.370 y 5.930 kWh respectivamente. Asimismo, destaca que el 20 % del consumo se destina a ACS y el 40% a calefacción, que, combinados, dan a entender que la cantidad de gas consumido se destina íntegramente a estos dos conceptos.
- Para el caso de España, el IDAE destaca que las viviendas en la zona norte consumen 10.331 kWh anuales, suponiendo un 40,1 % para calefacción y un para 21,9% ACS. De forma específica define, para el caso de la vivienda en bloque, consumos de 1.992 kWh y 2.255 kWh para calefacción y ACS respectivamente. En el caso de la vivienda unifamiliar estos valores aumentan hasta 2.500 kWh para ACS y 9.083 kWh para calefacción. El incremento en ACS (un 25 % mayor) puede deberse a una mayor ocupación de los edificios unifamiliares, aunque, lo más significativo, es que el consumo de calefacción se multiplica por cuatro en el caso unifamiliar, puesto que las viviendas son más grandes de media, están más expuestas y no se cuenta con el factor de simultaneidad con otros pisos, que sí se da en un edificio en bloque.

- Por otro lado, según el EVE, la calefacción se utiliza una media de 4,6 meses al año en Euskadi y el sistema que predomina con un 50 % es el individual (agua caliente sanitaria y calefacción).
- Otros aspectos que destaca también el EVE son:
    - Únicamente el 1,7 % de las viviendas vascas dispone de instalaciones de aire acondicionado.
    - El uso de energías renovables en la vivienda está cada vez más extendido, aunque todavía supone sólo el 5,3 % del total.
    - Un edificio construido antes de 1979 sin reformar tiene una demanda en calefacción de 2,8 veces superior que otro construido después del año 2007.
    - Existe un potencial de reducción del 40 % del consumo en calefacción por mejoras estructurales reformando toda vivienda anterior a 2007.

Teniendo en cuenta estas indicaciones, se va a definir el escenario de referencia basado en una aplicación residencial. Se busca proponer un caso que, a pesar de ser una representación simplificada, pueda ser considerado como una aproximación válida para el escenario que se quiere analizar. La descripción del edificio y los parámetros considerados son los representados en la Tabla 41. Los aspectos más destacables son:

- Se plantean dos casos a la vez debido a las apreciables diferencias que se dan entre viviendas unifamiliares aisladas y bloques de viviendas multifamiliares (SFH y MFH respectivamente por sus siglas en ingles). Es decir, se plantea una referencia doble contemplando una vivienda, pero, con dos variantes, para los que lo único que varía son las dimensiones y la cantidad de superficie que actúa a modo de envolvente del edificio. El resto de los factores permanecen iguales para todos los parámetros contemplados.
- Para la aplicación prevista, en la que se emplean fachadas solares, la diferenciación entre estos dos edificios también afecta a la superficie hábil de fachada para la integración de las fachadas solares propuestas en la tesis. En el caso de un edificio unifamiliar, siempre que no sea adosado, se asume que se cuenta con acceso a todas las orientaciones de fachada mientras que, en el caso del edificio en altura lo más probables es que se den limitaciones dependiendo de la vivienda considera. Para simplificar cuando se estudie un apartamento, se considerará que no hay restricciones de acceso a las fachadas en las diferentes orientaciones.
- Se va a plantear una representación escalable para el caso de los edificios multifamiliares. De forma análoga al caso unifamiliar, en el que se considera que el propietario tiene acceso a todos los elementos del edificio y que el sistema de producción de calor es individual, en el caso multifamiliar, se va a asumir que la porción de fachada necesaria para alojar el sistema activo y la parte correspondiente al sistema de producción (en caso de que sea un sistema centralizado), pueden ser escalados para considerar el conjunto como un sistema individual que emplea cada vivienda.
- Por otro lado, se asumirá que la referencia del edificio “no renovable” viene determinado por un sistema que emplea una caldera y gas natural para generar la producción de agua caliente para ACS y calefacción. Al realizar el comparativo con el caso “renovable”, se sustituirá la caldera por el sistema de bomba de calor acoplado a la fachada solar activa, con el fin de alcanzar ahorros significativos en el consumo.

- Es importante destacar que, los ahorros que se van a plantear al sustituir la caldera por la bomba de calor representan aproximadamente dos tercios del consumo total, pero que todavía resta un tercio de consumo, consumo íntegramente eléctrico, que queda fuera del alcance del estudio presentado, pero que, en cualquier caso, representa un factor relevante que se debería mejorar también cuando se plantean objetivos de edificios de baja o nula energía. Es decir, además de la propuesta con la sustitución del sistema, cabe destacar que también se deben revisar y optimizar el consumo energético relacionado con la iluminación, los electrodomésticos, las cocinas y el consumo de los sistemas de aire acondicionado, aunque éste último, en el entorno en el que se plantea el escenario de referencia, resulta ser minoritario.
- A la hora de plantear la contribución solar de la fachada activa, el objetivo será, primero priorizar cubrir la demanda de ACS con la energía solar, en línea con la estrategia planteada por el CTE, para a continuación aprovechar el resto de la energía obtenida para aplicaciones de calefacción. De esta forma se busca dar salida inmediata a la energía mediante la carga más predecible y estable a lo largo del año, dejando el equipo de calefacción como complemento.
- Finalmente se han considerado algunas referencias adicionales que se han consultado para definir el escenario en cuanto a:

    - Temperaturas de suministro del ACS y de la calefacción y las demandas globales de calefacción. Se han consultado 3 referencias diferentes [322] – [324]. En este caso y, dada la producción de agua caliente mediante bomba de calor, se consideran valores de suministro de agua caliente de baja temperatura (40°C) para calefacción (para uso en suelo radiante o radiadores de baja temperatura). Para el caso del ACS, estos valores resultan algo superiores (50°C) a la temperatura habitual de consumo, puesto que el agua caliente se acumula en un depósito de almacenamiento con el que se regula el desfase entre producción y consumo de agua para ACS.
    - Valores de ventilación y renovación del aire y factores para las ganancias internas [323] – [325].

| Parámetro | Valor | | | |
|---|---|---|---|---|
| Localización | Bilbao | | | |
| Tipología | Residencial Unifamiliar – SFH | Residencial Multifamiliar – MFH (se considera 1 vivienda del conjunto) | | |
| Dimensiones principales [planta] | Ancho: 10 m<br>Largo: 11 m<br>Alto: 3 m | Ancho: 9 m<br>Largo: 9,5 m<br>Alto: 3 m | | |
| Superficie en planta | 110 $m^2$ | 85,5 $m^2$ | | |
| Superficie total de envolvente | Exterior: 126 $m^2$<br>Medianera: 0 $m^2$ | Exterior: 55,5 $m^2$<br>Medianera: 55,5 $m^2$ | | |
| Nº de Ocupantes [325] | 4 | | | |
| Propiedades de la Envolvente<br><br>Valores característicos de una vivienda de la década de los 70 [321] | | Transmitancia térmica U ($W/m^2K$) | Superficie A ($m^2$) SFH | Superficie A ($m^2$) MFH |
| | Fachada | 1,6 | 55,5 | 126 |
| | Cubierta | 1,2 | 85,5 | 110 |
| | Forjado inferior | 1,7 | 85,5 | 110 |
| | Ventanas | 3,6 | 13,9 | 31,5 |
| | Puentes térmicos | $\Delta U_{\text{Puentes Térmicos}} = 0,1$ | | |
| | Factor ganancias solares | $g_S = g_E = g_O = g_N = (0,125\ U_{Ven})^{0,25}$ | | |
| Efectos convección [323] – [325] | Ventilación ($N_{Vent}$) | 0,5 renovaciones / hora | | |
| | Infiltraciones ($N_{Inf}$) | 0,25 renovaciones / hora | | |
| Ganancias Internas [323] – [325] | Equipos | 120 W / vivienda | | |
| | Usuarios | 100 W / persona | | |
| Patrón de uso | Residencial: Ocupación entre 0 – 10 h y 16 – 24 h | | | |
| Demanda de ACS | 561,3 kWh/persona y año<br>Valor según CTE para Bilbao. Descripción en apartado 3.1.1 | | | |
| Paneles Activos | Superficie | 18$m^2$ | | |
| | Orientación | Sur | | |
| | Rendimiento | Según Tabla 42 y ecuación (54) | | |
| Equipo de producción de calor | Bomba de calor de 6 kW de potencia<br>Rendimiento según Tabla 38: $COP_{min}$ | | | |
| Sistema de respaldo | Resistencias eléctricas (COP = 1) | | | |
| Rendimiento sistemas de producción | ACS = 90% | Calefacción = 90% | | |
| Temperatura consigna en invierno [322] – [324] | 20°C | | | |
| Temperatura de suministro de ACS [322] – [324] | 50°C | | | |
| Temperatura de suministro para calefacción [322] – [324] | 40°C | | | |

**Tabla 44. Relación de parámetros para describir los dos casos de referencia: unifamiliar y multifamiliar**

La información proporcionada permite establecer la referencia del caso en el que se plantea incorporar un sistema de fachada solar acoplado a la bomba de calor.

El siguiente paso será, valorar otras situaciones alternativas para lo que se plantearán escenarios diferentes de acuerdo con factores que tengan incidencia en alguno de los dos conceptos principales del análisis:

- Afectan a la demanda: Se verá afectada por la tipología constructiva, la ubicación y climatología asociada, la ocupación y uso y el tipo y tamaño de las viviendas.
- Afectan a la producción y al consumo: La ubicación influirá en la energía solar captada por la fachada, así como la superficie y orientación de los paneles. Asimismo, el tamaño de las cargas, el patrón de uso, la relación entre las cargas y la capacidad y rendimiento de los equipos de producción tendrán un impacto directo en el consumo final.

En el siguiente apartado 4 se van a proporcionar los detalles acerca de la forma en la que se van a plantear los escenarios alternativos.

### 3.3.1. Resultados para el caso de referencia

Al considerar las dos viviendas propuestas, unifamiliar (SFH) y multifamiliar (MFH) y calcular su demanda según el método descrito en el apartado 3.1, el resultado es distribución mensual de necesidades para calefacción variable, siendo para el caso del ACS, bastante constante. La Figura 127 representa la vivienda unifamiliar y la Figura 128 la multifamiliar.

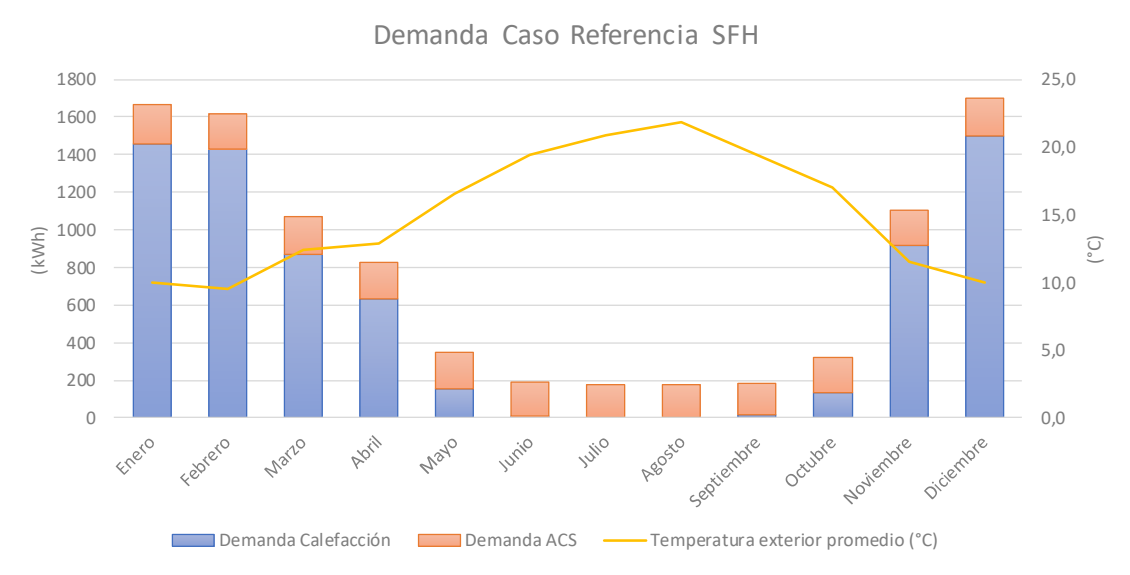



**Figura 127. Distribución mensual de la demanda necesaria para el caso de referencia de la vivienda unifamiliar (SFH)**

Si se consideran estas demandas para un sistema de producción con caldera de gas (rendimiento de 0,9) resultan unos consumos respectivos de 104,19 kWh/m$^2$ y 64,33 kWh/m$^2$ anuales de gas para SFH y MFH. Esto supone unos consumos anuales totales por vivienda de 11.461,29 kWh

para SFH y 5.500,11 kWh para MFH, valores que resultan bastante similares a los consumos promedio indicados tanto por el EVE como por el IDAE.

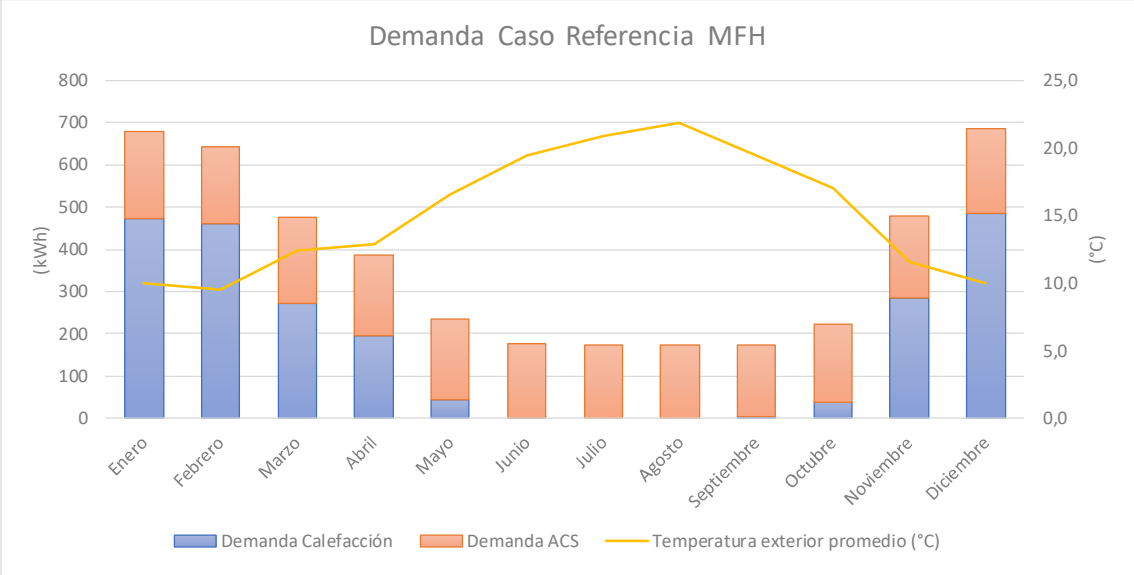



**Figura 128. Distribución mensual de la demanda necesaria para el caso de referencia de la vivienda residencial colectiva o multifamiliar (MFH)**

Tal y como se puede apreciar, los consumos en viviendas unifamiliares son muy superiores por el mayor tamaño, pero, sobre todo, porque este tipo de edificio se encuentra más expuestos, con una mayor cantidad de envolvente en contacto con el exterior, frente a las viviendas en edificios en bloque, en los que las viviendas adyacentes proporcionan cierta protección.

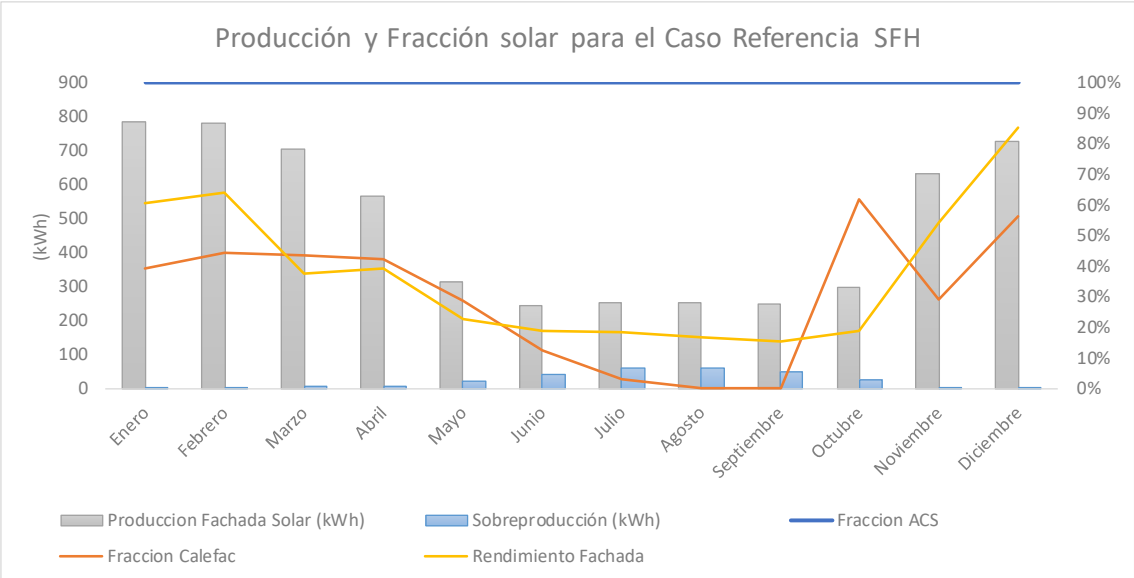



**Figura 129. Distribución mensual de la producción neta y la sobreproducción de la fachada solar, el rendimiento y el aprovechamiento de esta energía en forma de fracción solar para ACS y calefacción. Caso de referencia de vivienda unifamiliar (SFH)**

Cuando se plantea cubrir la demanda de estas dos viviendas con el sistema de fachada solar acoplado a la bomba de calor, el resultado que se da en cuanto a la producción solar de la envolvente activa, es el que se puede apreciar en las Figura 129 y Figura 130.

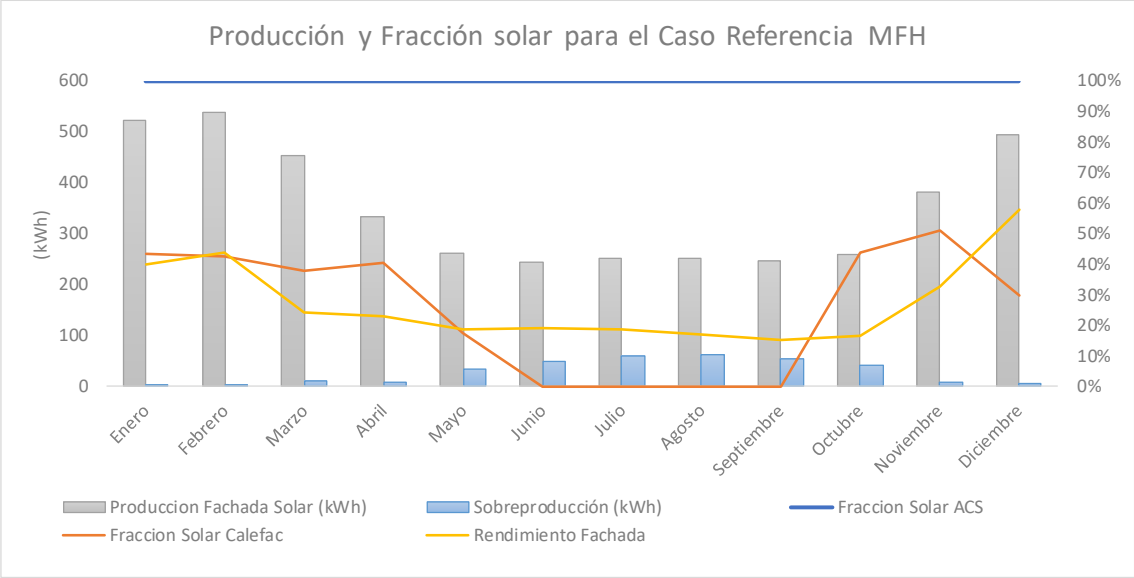



**Figura 130. Distribución mensual de la producción neta y la sobreproducción de la fachada solar, el rendimiento y el aprovechamiento de esta energía en forma de fracción solar para ACS y calefacción. Caso de referencia de vivienda residencial colectiva o multifamiliar (MFH)**

Al ser una fachada sur, las mayores producciones y rendimientos de la fachada solar se dan en invierno y la sobreproducción es mayor en verano. Debido a las complicaciones que genera la sobreproducción, esta energía hay que tratar de eliminarla o reducirla al mínimo, salvo que se cuente con una forma complementaria de aprovechar esa energía. Sin embargo, y, tal y como se va a confirmar más adelante al valorar el sistema activo de fachada, en general cuanto menor sea la sobreproducción en verano, menor será también la energía aprovechada y captada por el colector, por lo que se debe buscar un equilibrio entre ambos términos.

En cuanto a las diferencias entre ambas tipologías de edificios SFH y MFH, más allá de los valores alcanzados no se aprecian diferencias significativas entre estas dos tipologías de edificios ya que los términos representados en la Figura 129 y la Figura 130 resaltan una tendencia y forma similar en ambos casos. De forma específica para las dos tipologías se consigue una fracción solar de ACS del 100 % y de 37 – 43 % para la calefacción. Es decir, y, tal y como se ha propuesto al plantear el estudio, la producción de ACS busca una producción con origen mayoritariamente de fuentes renovables y el excedente producido se destina a calefacción.

Además del comportamiento de la fachada, que se destaca de forma tabulada a continuación, el rendimiento y energía asociados a la bomba de calor son factores también a analizar. Las siguientes Tabla 45 y Tabla 46 describen la evolución mensual de estos términos para el caso SFH y MFH respectivamente.

| | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic | **Total** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Demanda Calefacción (kWh) | 1.605,3 | 1.574,5 | 957,8 | 699,5 | 173,5 | 13,1 | 0,0 | 0,0 | 15,8 | 149,5 | 1.007,3 | 1.649,9 | **7.846,2** |
| Demanda ACS (kWh) | 226,5 | 200,6 | 222,0 | 210,6 | 208,7 | 193,4 | 191,0 | 191,0 | 189,1 | 204,3 | 210,6 | 221,3 | **2.469,0** |
| Producción Fachada Solar (kWh) | 796,4 | 788,4 | 707,3 | 578,4 | 315,8 | 242,7 | 251,1 | 252,3 | 247,8 | 309,3 | 653,5 | 742,0 | **5.885,0** |
| Rendimiento Fachada | 61% | 65% | 38% | 40% | 23% | 19% | 19% | 17% | 15% | 20% | 56% | 87% | **35%** |
| Fracción Solar ACS | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | **100%** |
| Fracción Solar Calefacción | 37% | 41% | 41% | 44% | 32% | 18% | 0% | 0% | 0% | 48% | 28% | 52% | **38%** |
| Sobreproducción (kWh) | 1,9 | 1,2 | 5,9 | 6,0 | 22,7 | 42,0 | 60,2 | 61,3 | 48,8 | 25,6 | 3,7 | 2,1 | **281,5** |
| Temperatura exterior promedio (°C) | 10,0 | 9,5 | 12,4 | 12,8 | 16,5 | 19,4 | 20,9 | 21,9 | 19,4 | 17,0 | 11,5 | 10,0 | **15,1** |
| Electricidad HP (kWh) | 831,4 | 784,9 | 470,0 | 362,9 | 137,7 | 63,0 | 58,3 | 58,3 | 63,8 | 125,2 | 520,7 | 849,4 | **4.325,6** |
| SCOP Promedio | 2,0 | 2,1 | 2,3 | 2,3 | 2,5 | 3,0 | 3,0 | 3,0 | 2,9 | 2,6 | 2,1 | 2,0 | **2,5** |

**Tabla 45. Evolución mensual y totales anuales de los parámetros principales para el sistema de fachada solar acoplado a la bomba de calor. SHF**

| | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic | **Total** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Demanda Calefacción (kWh) | 518,4 | 505,2 | 300,9 | 213,5 | 49,4 | 2,7 | 0,0 | 0,0 | 3,7 | 41,0 | 314,1 | 532,2 | **2.481,1** |
| Demanda ACS (kWh) | 226,5 | 200,6 | 222,0 | 210,6 | 208,7 | 193,4 | 191,0 | 191,0 | 189,1 | 204,3 | 210,6 | 221,3 | **2.469,0** |
| Producción Fachada Solar (kWh) | 483,7 | 488,7 | 385,2 | 306,6 | 263,5 | 242,7 | 251,1 | 252,3 | 245,2 | 262,4 | 339,0 | 455,7 | **3.975,9** |
| Rendimiento Fachada | 37% | 40% | 21% | 21% | 19% | 19% | 19% | 17% | 15% | 17% | 29% | 54% | **24%** |
| Fracción Solar ACS | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | **100%** |
| Fracción Solar Calefacción | 41% | 49% | 45% | 36% | 33% | 17% | 0% | 0% | 0% | 79% | 58% | 34% | **43%** |
| Sobreproducción (kWh) | 2,2 | 1,9 | 7,1 | 7,3 | 28,2 | 46,6 | 60,2 | 61,3 | 52,4 | 33,0 | 5,0 | 2,9 | **308,0** |
| Temperatura exterior promedio (°C) | 10,0 | 9,5 | 12,4 | 12,8 | 16,5 | 19,4 | 20,9 | 21,9 | 19,4 | 17,0 | 11,5 | 10,0 | **15,1** |
| Electricidad HP (kWh) | 321,8 | 310,6 | 217,3 | 171,4 | 91,5 | 65,8 | 64,1 | 64,1 | 64,7 | 84,0 | 219,4 | 327,4 | **2.001,9** |
| SCOP Promedio | 2,3 | 2,3 | 2,4 | 2,5 | 2,8 | 3,0 | 3,0 | 3,0 | 3,0 | 2,9 | 2,4 | 2,3 | **2,7** |

**Tabla 46. Evolución mensual y totales anuales de los parámetros principales para el sistema de fachada solar acoplado a la bomba de calor. MHF**

Al analizar la evolución anual se ve cómo la fracción solar se mantiene cubierta al 100% en todos los meses y que la de calefacción es mayor en invierno, cuando se dan las mayores demandas, y baja hasta cero en verano puesto que no se utiliza la calefacción en esos meses. Esta situación afecta a otros parámetros relacionados y pudiéndose apreciar como el rendimiento de la bomba de calor cae en invierno por la mayor necesidad de producción para calefacción, lo que implica consumos de electricidad mayores.

| | SFH | MFH |
|---|---|---|
| Demanda Calefacción (kWh) | 7.846,18 | 2.481,12 |
| Demanda ACS (kWh) | 2.468,99 | 2.468,99 |
| Producción Fachada Solar (kWh) | 5.884,97 | 3.975,92 |
| Producción Superficial Fachada (kWh/m$^2$) | 326,94 | 220,88 |
| Rendimiento Fachada | 35,5% | 24,0% |
| Fracción Solar ACS | **100,0%** | **100,0%** |
| Fracción Solar Calefacción | **37,9%** | **43,5%** |
| Fracción Solar anual Promediada | **54,3%** | **74,1%** |
| Sobreproducción (kWh) | 281,46 | 307,99 |
| Relación Sobreproducción / Demanda | 2,7% | 6,2% |
| Temperatura exterior promedio (°C) | 15,11 | 15,11 |
| Electricidad Sistema Bomba Calor (kWh) | 4.325,61 | 2.001,94 |
| SCOP Promedio Sistema | 2,47 | 2,65 |
| Energía para picos de Potencia (kWh) | 251,99 | 0,00 |
| Energía para picos de Potencia (h) | 212 | 0 |

**Tabla 47. Resultados principales del sistema combinado, comparando unifamiliar (SFH) y residencial colectiva (MFH). Casos de referencia**

Al comparar en una tabla los resultados acumulados en el año para los dos casos de referencia, se aprecia en un primer análisis las diferencias que se dan entre ambas tipologías de vivienda, para las que únicamente se ha cambiado la geometría y la cantidad de fachada expuesta al exterior, siendo el resto de los parámetros iguales para los dos casos. Esta diferenciación representa un cambio en la demanda, únicamente la de calefacción cambia manteniendo la de ACS, cambio que afecta en el comportamiento y producción energética de la fachada solar. La Tabla 47 muestra los principales resultados al comparar ambas viviendas.

En cuanto a la respuesta de la fachada solar y el comportamiento del sistema operado con la bomba de calor al cambiar de SFH a MFH, los aspectos más destacables son los siguientes:

- Como era de esperar el incremento de la demanda tiene un impacto directo en el incremento de la producción de la fachada solar. Este incremento de producción solar y de rendimiento, es de un 48 % en el caso de SFH, para un consumo un 108 % mayor.
- En ambos casos la fracción solar para ACS cubre el 100 % de la demanda y se consigue cubrir un 43,5 % y 37,9 % de la energía destinada a calefacción para MFH y SFH respectivamente, lo que implica en cada caso un 74,1 % y 54,3 % de fracción solar del total.
- La menor demanda del caso MFH implica que se da una sobreproducción de la fachada solar de 307,99 kWh anuales que suponen un 6,2 % de la demanda total, energía que no se puede aprovechar para las necesidades de la vivienda. En el caso de SFH, esta sobreproducción es menor, 281,46 kWh, que representan un 2,7 % del total.
- En cuanto a la bomba de calor, la electricidad consumida implica 2.001,94 kWh anuales para MFH y 4.325,61 kWh para SFH. Estos consumos representan 23,41 kWh/$m^2$ y kWh/$m^2$ 43,26 kWh/$m^2$ respectivamente. Cuando el sistema contemplado era la caldera de gas, estos consumos eran de 64,33 kWh/$m^2$ y 104,19 kWh/$m^2$ anuales para MFH y SFH. Se puede apreciar que, a pesar de haber considerado el COP mínimo, los ahorros conseguidos son muy significativos, pero también implica cambiar de fuente de energía primaria sustituyendo el gas por un equipo alimentado con electricidad.
- En el caso de la vivienda multifamiliar, no se dan picos que superen la potencia máxima de la bomba de calor, por lo que el sistema de respaldo no se activa en ningún momento del año. Para el caso unifamiliar (SFH), sí se dan ciertos picos, para un total de 212 horas anuales, que requieren una energía complementaria de 251,99 kWh para cubrir esas horas de potencia máxima.

El caso que se ha presentado implica un cambio en la demanda del edificio, manteniendo los mismos elementos y equipos de producción: 18$m^2$ de fachada solar orientada al sur y conjunto con bomba de calor con las características descritas en la Tabla 24. Con el fin de valorar otras situaciones alternativas al variar demanda, el sistema de producción o, ambos a la vez, en los siguientes apartados se van a representar una serie de escenarios diferentes para valorar la respuesta del conjunto frente a situaciones diferentes.

# 4. ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS PARA CONSIDERAR DIFERENTES ESCENARIOS

El modelo planteado proporciona una estimación razonable de la demanda de un edificio y, relacionada con esta, se puede estimar también la producción solar de la fachada activa, así como el consumo que implica para el conjunto con bomba de calor.

Una vez se ha escogido el escenario de referencia, se plantea un estudio de diferentes situaciones alternativas con el fin de contemplar y analizar el efecto que los cambios de escenario tienen en el rendimiento y funcionamiento de la fachada activa y en el sistema acoplado. Para ello, en línea con la aproximación planteada y comentada en el apartado previo, se van a considerar diferentes casos en aspectos que impliquen una variación de la demanda, del sistema de producción de energía, o escenarios mixtos variando a la vez demanda y sistema de producción.

De esta forma y, en línea con el enfoque simplificado que se ha adoptado para el cálculo, se van a valorar factores que afecten a estos dos elementos:

- Factores que afectan a la demanda del edificio:
    - La tipología y el tamaño del edificio. Como escenarios alternativos se pueden considerar edificios más o menos aislados que afectarán a la envolvente del edificio, aspecto que será analizado al variar los valores de transmitancia térmica (U) de la envolvente, el factor de ganancias solares (g) a través de los huecos y el efecto convectivo debido a la ventilación y las infiltraciones. La consideración de la vivienda aislada o en bloque se mantiene en este análisis, por lo que un factor relevante será la cantidad de superficie de envolvente que da al exterior, tanto para analizar las ganancias y pérdidas térmicas, como por la posibilidad de incorporar los paneles de fachadas activas a esa envolvente.
      En cuanto al tamaño y forma, se suponen geometrías simples: cuadradas y rectangulares.
    - La ubicación. Este factor que afecta tanto a la demanda como a la producción de los paneles solares, en este caso se considera para analizar la incidencia que tiene en la demanda y, especialmente, en la demanda de calefacción al aumentar en los climas fríos, o reducirse en las zonas más cálidas. La ubicación también tiene cierta incidencia en la demanda de ACS, puesto que, de acuerdo con lo contemplado por el DB-HE del CTE, la temperatura del agua de suministro de red varía también en función de la localización, aunque en una proporción mucho menor.
    - La ocupación. Afecta también a las ganancias internas y a la demanda de calefacción, y, de forma directa y proporcional a la demanda de ACS, puesto que ésta es función del número de ocupantes de la vivienda.
- Factores que afectan a la producción de los equipos de calor:
    - Características del sistema de fachada activa. Los aspectos que influyen en la fachada solar, en su producción y rendimiento, son principalmente la ubicación (al igual que en la demanda), la orientación de los paneles en el plano vertical de la envolvente y la cantidad de superficie activa instalada. Resulta importante destacar de nuevo la relación directa que se da entre producción del sistema activo y la demanda (recogido en la ecuación (44)) y que aunque en este caso se

presenten en dos apartados diferentes, existe una relación de dependencia entre la producción de la fachada solar y la demanda.

- Características del sistema de producción: sistema con bomba de calor. En este caso se ha simplificado todo el conjunto a un sistema que tiene un consumo final de electricidad y que, a cambio, suministra una producción de energía térmica. Se han obviado así los componentes principales como el tanque solar, o las baterías de calor, para los que no se pretende en este caso realizar una modelización más detallada, aunque el consumo eléctrico sí se encuentra recogido en el COP del sistema. Por tanto, se plantea una variación del COP entre unos valores máximos y mínimos, estableciendo una capacidad máxima de potencia de la bomba de calor y de rendimientos de todo el conjunto.

En los siguientes apartados se describen la forma en la que se van a considerar la variación de estos factores para representar los escenarios alternativos.

## 4.1. Factores que afectan a la demanda del edificio

### 4.1.1. Tipología y tamaño de la vivienda

En este caso se trata de analizar fundamentalmente los parámetros relacionados con la envolvente [326], contemplando valores diferentes de transmitancia térmica y de ganancias solares (g) a través de los huecos. Asimismo, el efecto convectivo debido a la ventilación y las infiltraciones se consideran también. Para contemplar los valores alternativos de los elementos de la envolvente, se toman las referencias de los estudios realizados en los que se establecen relaciones entre diferentes periodos de construcción en Europa [321] y en España [327].

Además, proponer tamaños diferentes de viviendas permite valorar cómo afecta el mayor o menor tamaño de esta, pero, más que el efecto en los cambios de superficie construida, que también tiene cierta incidencia, el interés principal radica en considerar la cantidad de superficie de envolvente y cómo afecta ésta a la demanda. Además, en el caso de la SFH, se asume que toda la fachada exterior está expuesta, pero en la MFH, se pueden dar situaciones muy variadas por la existencia o no de viviendas adyacentes en los diferentes planos de la envolvente.

Para valorar alternativas en cuanto a los factores que afectan a todo lo indicado anteriormente, se contemplan los siguientes casos:

- Nivel de aislamiento: Alto, medio y bajo.
- Tamaño de vivienda: Pequeña, media, grande.
- Grado de exposición en fachadas. Únicamente para el caso MFH: muy expuesta, exposición media y poco expuesta.

De forma explícita las siguientes tablas cuantifican los valores entre los que se alternarán estos factores. La Tabla 48 muestra las opciones a valorar al variar el nivel de aislamiento de la vivienda, la Tabla 49 los diferentes tamaños de vivienda y la Tabla 50 los diferentes grados de exposición para una vivienda residencial colectiva (MFH) como la de referencia con una superficie en planta de 85,5 $m^2$.

| Nivel de aislamiento de la vivienda | | Elevado | Medio | Bajo |
|---|---|---|---|---|
| Propiedades de la Envolvente | | Transmitancia térmica U ($W/m^2K$) | | |
| | Fachada | 0,4 | 1,6 | 2,5 |
| | Cubierta | 0,2 | 1,2 | 1,8 |
| | Forjado inferior | 0,3 | 1,7 | 2,5 |
| | Ventanas | 1,6 | 3,6 | 5,2 |
| | Puentes térmicos | $\Delta U_{PT} = 0,05$ | $\Delta U_{PT} = 0,1$ | $\Delta U_{PT} = 0,2$ |
| | Factor ganancias solares | $g_S = g_E = g_O = g_N = (0,125\ U_{Ven})^{0,25}$ | | |
| Efectos convección | Ventilación ($N_{Vent}$) | 0,3 ren. / h | 0,5 ren. / h | 1 ren. / h |
| | Infiltraciones ($N_{Inf}$) | 0,1 ren. / h | 0,25 ren. / h | 0,5 ren. / h |

**Tabla 48. Alternativas para valorar las propiedades de la envolvente y los efectos convectivos**

| Tamaño de la vivienda | Grande | | Medio | | Pequeño | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | SFH | MFH | SFH | MFH | SFH | MFH |
| Superficie en planta ($m^2$) | 300 | 192 | 110 | 85,5 | 60 | 49 |
| Envolvente exterior ($m^2$) | 210 | 84 | 126 | 55,5 | 96 | 42 |
| Medianera ($m^2$) | 0 | 84 | 0 | 55,5 | 0 | 42 |

**Tabla 49. Alternativas para valorar diferentes tamaños de vivienda y envolvente**

| Nivel de exposición de la envolvente | Alto | Medio | Bajo |
|---|---|---|---|
| Envolvente exterior ($m^2$) | 82,5 | 55,5 | 28,5 |
| Medianera ($m^2$) | 28,5 | 55,5 | 82,5 |

**Tabla 50. Alternativas para valorar diferentes grados de exposición de envolvente en MFH**

Resulta importante destacar que, si se considera un escenario de rehabilitación en el que se superpone la fachada activa a parte de la fachada existente, se puede considerar, además, el aporte que el aislamiento térmico del sándwich proporciona, viendo cómo se va incrementado el valor de U al contemplar la suma de transmitancias térmicas aportada por cada capa [328].

Respecto al tamaño de la vivienda, la unidad de análisis seguirá siendo la vivienda y, aunque se podrían considerar edificios en bloque de diferentes dimensiones, esto implicaría variar y/o escalar otra serie de parámetros, generando un abanico demasiado amplio de alternativas que, en este caso, no es lo que se está buscando. En cualquier caso, se considera que el análisis contemplando un apartamento dentro de un bloque, ya cubre de forma adecuada situaciones generales que se puedan dar en diferentes escenarios de edificación colectiva y que los resultados pueden ser escalables.

Lo que sí resulta relevante en la edificación colectiva es la cantidad de superficie expuesta del apartamento, para lo que se ha introducido el factor de "grado de exposición" descrito en la Tabla 50. En este caso, se han considerado la envolvente de la vivienda para diferentes escenarios de MFH, asumiendo superficies que delimitan el interior y el exterior del edificio que contribuyen al balance energético.

### 4.1.2. La ubicación

La ubicación y, por ende, la climatología del lugar es sin duda uno de los aspectos más determinantes para el análisis de la eficiencia energética de los edificios, tanto para determinar la demanda, como por las implicaciones que tiene en cuanto a la disponibilidad de energía en forma de radiación solar y temperatura exterior.

En este caso y, puesto que se está contemplando en primer lugar la demanda, la localización afectará fundamentalmente a las ganancias y pérdidas de calor a través de la envolvente y a las ganancias solares al atravesar la radiación las ventanas (apartado 3.1.2).

Por otro lado, la ubicación establece la temperatura de suministro del agua de red para la localización [297], factor que influye en la cantidad de energía demandada para producción de ACS tal y como se ha indicado en el apartado 3.1.1.

Tal y como se va a indicar más adelante (apartado 4.2), la ubicación también afecta a la producción y de forma directa en la producción de la facha solar puesto que ésta es proporcional a la radiación disponible en el plano vertical.

Un aspecto importante a considerar para el cálculo es la información con la que se van a calcular las alternativas, con el nivel de fiabilidad de dichos datos. En este caso, se van a emplear información contrastada y definida como “año meteorológico típico” por *Energy Plus* [329].

En cuanto a las localizaciones a considerar se plantean otras ciudades con las que valorar una climatología diferente tanto a nivel nacional, como en Europa. Así y, además de Bilbao, se van a valorar las siguientes ciudades: Madrid, Sevilla, Bruselas y Estocolmo.

### 4.1.3. La ocupación

La ocupación del edificio afecta a las dos demandas a la vez. Por un lado, la demanda de ACS es directamente proporcional al número de ocupantes y al uso que se da al edificio. Esta demanda que, ya se ha indicado también en el punto anterior se modifica al cambiar la ubicación, varía principalmente al aumentar o reducir la cantidad de personas que ocupan la vivienda por lo que será el factor determinante a valorar.

Por otro lado, la demanda de calefacción también se altera con la ocupación asociada a las ganancias internas que se dan debido al uso de la vivienda. En este caso, además del número de ocupantes, también se van a contemplar diferentes factores de ganancias internas.

Teniendo en cuenta el mayor interés en la demanda de ACS puesto que, tal y como se ha indicado anteriormente, representa beneficios en términos de regularidad y previsibilidad en la forma en la que se da la demanda, se van a contemplar una serie escenarios alternativos para la ocupación recogidos en la Tabla 52. La consideración de ocupaciones muy superiores a la de referencia implica, de forma indirecta, usos diferentes al residencial en escenarios en los que se dan unas demandas elevadas de ACS, como pueden ser gimnasios, polideportivos etc. En ese caso el estudio contemplaría una porción del edificio, representativo del mismo, porción escalable como en el caso de viviendas colectivas en edificios en bloque.

| Nivel de Ocupación | Bajo | Medio | Alto | Muy Alto |
|---|---|---|---|---|
| Ocupantes | 1 | 4 | 10 | 20 |

**Tabla 51. Alternativas para valorar diferentes niveles de ocupación**

| Ganancias Internas | Bajas | Medias | Altas |
|---|---|---|---|
| Equipos (W/vivienda) | 60 | 120 | 400 |
| Usuarios (W/persona) | 60 | 100 | 200 |

**Tabla 52. Alternativas para valorar diferentes ganancias internas**

## 4.2. Factores que afectan a la producción de los equipos de calor

### 4.2.1. Características del sistema activo de fachada

La representación que se va a hacer en este cálculo para la fachada activa permite alterar básicamente la superficie de paneles y la orientación de fachada en la que se montan. Tal y como se ha visto en los capítulos III y IV, cuando se analizan los paneles con más detalle, hay más factores dinámicos que pueden considerarse, como el caudal o la temperatura de impulsión, pero para un análisis a escala edificio como el propuesto, se considera que los parámetros dos propuestos (superficie y orientación) permiten valorar convenientemente la contribución del sistema activo, entendiendo que se opera en valores promediados para el resto de factores.

Asimismo, se tomará en consideración también la disponibilidad de superficie en los planos de fachada para instalar los paneles activos. En el caso de las viviendas unifamiliares se asume que toda la envolvente está disponible, pero, en el caso de las viviendas colectivas, tal y como se ha comentado al plantear la superficie expuesta al exterior, habrá superficies y medianeras que se generan en el encuentro entre viviendas que no pueden ser consideradas como envolvente exterior. La cantidad de huecos, ventanas y otros elementos también serán factores limitantes.

En cualquier caso y, para simplificar el análisis, se considerará que la restricción de superficie afectará únicamente al área disponible y que, a priori, en todos los casos se tiene acceso a todas las orientaciones. Dado que la radiación incidente en la orientación norte resulta muy inferior a las otras tres, se descarta la instalación de paneles de fachada solar en esta orientación.

Por tanto, las alternativas consideradas para el sistema activo son las descritas en la siguiente Tabla 53, para la que se consideran múltiplos de 6m$^2$ de fachada activa que resultan del conjunto mínimo considerado en la experimentación descrita en el capítulo previo.

| Superficie Activa (m$^2$) | 6 | 12 | 18 | 24 | 30 |
|---|---|---|---|---|---|
| Orientación | O | | S | | E |

**Tabla 53. Alternativas para valorar superficie y orientación de fachadas solares**

### 4.2.2. Características del sistema de producción

Además de la fachada activa el componente principal que, para una demanda dada, afectará al consumo final del edificio será el sistema de producción que se caracteriza por su componente principal: la bomba de calor.

En este caso, para el sistema operado por bomba de calor ya se ha establecido en el apartado 3.2 que se va a acotar el COP del sistema completo entre un valor máximo y mínimo (Tabla 38). A pesar de que el COP se ve influido por múltiples parámetros y factores que se ven modificados por las condiciones de funcionamiento, como la ubicación o el régimen de funcionamiento [316], tal y como se ha comentado en ese apartado anterior, en este caso se trata de una aproximación entre rangos máximos y mínimos.

El segundo factor que contemplar será la potencia máxima que se puede alcanzar con este sistema y que, tal y como se ha descrito en la Tabla 24, se ha fijado en 6 kW para el caso de referencia. En este caso y, de cara a conocer el balance final energético, interesa conocer durante cuántas horas se sobrepasa ese umbral y resulta necesario activar el equipo de respaldo, que supondrá un consumo eléctrico adicional al de la bomba de calor. Para simplificar se considera que ese exceso se cubre con resistencias eléctricas (COP = 1) y el consumo se suma al de la bomba de calor.

Por tanto, las alternativas consideradas para el sistema activo son las descritas en la siguiente Tabla 54.

| COP Sistema | $COP_{MAX}$ (Tabla 38) | | $COP_{min}$ (Tabla 38) |
|---|---|---|---|
| Potencia Max. Bomba de calor | 3 | 6 | 12 |
| Sistema de respaldo / rendimiento | Resistencias eléctricas: COP = 1 | | Caldera de gas: η = 0,9 |

**Tabla 54. Alternativas para valorar superficie y orientación de fachadas solares**

# 5. INCIDENCIA DEL SISTEMA ACTIVO CONTEMPLANDO ESCENARIOS ALTERNATIVOS

## 5.1. Resultados para los escenarios planteados

La siguiente Tabla 55 recoge, a modo de resumen, todas las alternativas que se van a analizar. Se trata de la relación de factores que se van a modificar para contemplar escenarios alternativos al de referencia, escenario que se ha establecido para dos tipos de viviendas SFH y MFH y cuya descripción se corresponde con las características indicadas en la Tabla 24.

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Factores que afectan a la demanda | Tipología y tamaño de la vivienda | Nivel de aislamiento de la vivienda | Elevado | | Medio | | Bajo |
| | | Tamaño de la vivienda | Grande | | Medio | | Pequeño |
| | | Nivel de exposición de la envolvente | Alto | | Medio | | Bajo |
| | Ubicación | Sevilla | Bilbao | Madrid | Bruselas | | Estocolmo |
| | Ocupación | Nivel ocupación | Bajo | Medio | Alto | | Muy Alto |
| | | Ganancias Internas | Bajas | | Medias | | Altas |
| Factores que afectan a la producción | Sistema de fachada activa | Superficie Activa ($m^2$) | 6 | 12 | 18 | 24 | 30 |
| | | Orientación | | O | | S | E |
| | Sistema de producción | COP sistema | Máximo | | | Mínimo | |
| | | Potencia Max. Bomba de calor | 3 | | 6 | | 12 |
| | | Sistema de respaldo | Resistencias eléctricas | | Caldera de gas | | |

**Tabla 55. Relación de parámetros a modificar para plantear escenarios alternativos al de referencia**

Se presentan a continuación los resultados del análisis contemplando diferentes escenarios de edificación, para los que se van a analizar primero los factores que afectan a la demanda y, a continuación, los que a afectan a la producción. Se van a valorar tanto los resultados que se aprecian para la respuesta de la solución de fachada solar, como del sistema de producción con bomba de calor acoplado a esta.

### 5.1.1. Factores que afectan a la demanda

Tal y como se ha comentado, modificar la demanda implica modificar la producción también. En esta sección se van a describir los efectos que se aprecian al cambiar parámetros que afecten a la demanda.

En primer lugar, se presentan a continuación los resultados al variar los parámetros que definen la tipología de la vivienda.

| | Resultados para tipologías alternativas en MFH | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Referencia MFH | Aislami. Elevado | Aislam. Bajo | Apartam. Grande | Apartam. Pequeño | Sup. Muy Expuesta | Sup. Poco expuesta |
| Demanda Calefacción (kWh) | 2.481,1 | 261,1 | 5.198,6 | 5.982,5 | 2.196,0 | 5.089,7 | 1.553,7 |
| Demanda ACS (kWh) | 2.469,0 | 2.469,0 | 2.469,0 | 2.469,0 | 2.469,0 | 2.469,0 | 2.469,0 |
| Producción Fachada Solar (kWh) | 3.975,9 | 2.999,4 | 5.259,0 | 5.472,2 | 3.802,7 | 5.199,8 | 3.463,2 |
| Producción sup. Fachada (kWh/m$^2$) | 220,9 | 166,6 | 292,2 | 304,0 | 211,3 | 288,9 | 192,4 |
| Rendimiento Fachada | 24% | 18% | 32% | 33% | 23% | 31% | 21% |
| Fracción Solar ACS | **100%** | **100%** | **100%** | **100%** | **100%** | **100%** | **100%** |
| Fracción Solar Calefacción | 43% | 40% | 36% | 35% | 41% | 35% | 39% |
| Fracción Solar anual Promediada | 74% | 95% | 65% | 62% | 75% | 65% | 78% |
| Sobreproducción (kWh) | 308,0 | 409,4 | 271,9 | 265,1 | 313,8 | 272,9 | 327,9 |
| Rel. Sobreproducción / Demanda | 6% | 15% | 4% | 3% | 7% | 4% | 8% |
| Electricidad Sis. Bomba Calor (kWh) | 2.001,9 | 930,9 | 3.253,7 | 3.660,9 | 1.864,4 | 3.202,7 | 1.557,2 |
| SCOP Promedio Sistema | 2,7 | 2,9 | 2,6 | 2,5 | 2,7 | 2,6 | 2,7 |
| Energía picos de Potencia (kWh) | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 8,4 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| Energía para picos de Potencia (h) | 0 | 0 | 0 | 28 | 0 | 0 | 0 |

**Tabla 56. Resultados para escenarios alternativos modificando la tipología de la vivienda MFH**

| | Resultados para tipologías alternativas en SFH | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Referencia SFH | Aislamiento Elevado | Aislamiento Bajo | Vivienda Grande | Vivienda Pequeña |
| Demanda Calefacción (kWh) | 7.846,2 | 1.346,2 | 13.703,2 | 13.544,7 | 6.595,9 |
| Demanda ACS (kWh) | 2.469,0 | 2.469,0 | 2.469,0 | 2.469,0 | 2.469,0 |
| Producción Fachada Solar (kWh) | 5.885,0 | 3.375,0 | 6.755,1 | 6.714,3 | 5.582,6 |
| Producción sup. Fachada (kWh/m$^2$) | 326,9 | 187,5 | 375,3 | 373,0 | 310,1 |
| Rendimiento Fachada | 35% | 20% | 41% | 40% | 34% |
| Fracción Solar ACS | **100%** | **100%** | **100%** | **100%** | **100%** |
| Fracción Solar Calefacción | 38% | 40% | 35% | 35% | 42% |
| Fracción Solar anual Promediada | 54% | 79% | 40% | 40% | 58% |
| Sobreproducción (kWh) | 281,5 | 343,0 | 268,3 | 268,6 | 285,7 |
| Rel. Sobreproducción / Demanda | 3% | 9% | 2% | 2% | 3% |
| Electricidad Sist. Bomba Calor (kWh) | 4.758,2 | 1.458,6 | 8.202,2 | 8.087,0 | 3.999,5 |
| SCOP Promedio Sistema | 2,5 | 2,7 | 2,3 | 2,3 | 2,5 |
| Energía picos de Potencia (kWh) | 252,0 | 0,0 | 2.314,8 | 2.218,0 | 83,4 |
| Energía para picos de Potencia (h) | 212 | 0 | 901 | 888 | 103 |

**Tabla 57. Resultados para escenarios alternativos modificando la tipología de la vivienda SFH**

Los aspectos más destacables en cuanto al sistema de fachada activa son:

- El aumento de la demanda asociada al menor nivel de aislamiento, superficie de envolvente más expuesta y al mayor tamaño de la vivienda implica rendimientos y producciones mayores del sistema de fachada solar. En sentido opuesto, la reducción de la demanda en viviendas más pequeñas, menos expuestas o mejor aisladas supone disminuir la producción solar y el rendimiento.
- Los niveles de producción por superficie de fachada varían entre 166,6 kWh/m$^2$ y 304 kWh/m$^2$ para el caso MFH y entre 187,5 kWh/m$^2$ y 375,3 kWh/m$^2$ para el caso MFH. Estas producciones suponen rendimientos de 18 – 33 % para MFH y de 20 – 41 % para SFH.
- Las fracciones alcanzadas para ACS superan en todos los casos el 100%, lo que da lugar también a cierta sobreproducción en los meses de verano. La fracción solar para calefacción no varía demasiado para MFH, quedando acotada a un rango entre el 35 y el 43 %, lo que supone una fracción solar de 62 – 95 % de la demanda total. En el caso de SFH, la fracción solar se queda en 38 – 42 %, dando lugar a una fracción solar de 40 – 79 % sobre el total.
- En cuanto a la sobreproducción, la mayor se da cuando la demanda es menor. En el caso de SFH implica una sobreproducción de 409,4 kWh anuales que implican un 15 % de la

demanda total. Para la MFH, la mayor sobreproducción supone 343 kWh y un 9 % al año.

Por otro lado, los aspectos más destacables para el sistema de producción son:

- El consumo anual de electricidad para MFH varía entre 930,9 kWh para la vivienda más aislada y 3.660,9 kWh para el apartamento más grande. Estos consumos implican un COP medio estacional del sistema de 2,9 y 2,5 respectivamente. En el caso del MFH no se dan picos en los que se exceda la capacidad de producción de la bomba de calor.
- El consumo anual de electricidad para SFH varía entre 1.458,6 kWh para la vivienda más aislada y 8.202,2 kWh para la menos aislada. Estos consumos implican un COP medio estacional del sistema de 2,7 y 2,3. En este caso sí se dan picos de producción, salvo en el caso de menor consumo, requiriendo, en el peor de los casos, 2.314,8 kWh extra durante 901 horas.

El efecto al cambiar la localización se recoge en las siguientes Tabla 58 y Tabla 59.

| | Resultados para localizaciones alternativas en MFH | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Sevilla | Referencia Bilbao | Madrid | Bruselas | Estocolmo |
| Demanda Calefacción (kWh) | 1.565,0 | 2.481,1 | 4.945,0 | 8.246,9 | 16.339,7 |
| Demanda ACS (kWh) | 2.324,0 | 2.469,0 | 2.454,5 | 2.638,5 | 2.793,5 |
| Producción Fachada Solar (kWh) | 3.511,0 | 3.975,9 | 5.551,6 | 6.037,1 | 7.919,9 |
| Producción sup. Fachada (kWh/m$^2$) | 195,1 | 220,9 | 308,4 | 335,4 | 440,0 |
| Rendimiento Fachada | 15% | 24% | 25% | 44% | 47% |
| Fracción Solar ACS | **100%** | **100%** | **100%** | **100%** | **100%** |
| Fracción Solar Calefacción | 40% | 43% | 45% | 46% | 39% |
| Fracción Solar anual Promediada | 79% | 74% | 71% | 54% | 41% |
| Sobreproducción (kWh) | 432,2 | 308,0 | 269,6 | 118,4 | 57,7 |
| Rel. Sobreproducción / Demanda | 11% | 6% | 4% | 1% | 0% |
| Temperatura exterior promedio (°C) | 18,1 | 15,1 | 13,9 | 9,7 | 5,2 |
| Electricidad Sist. Bomba Calor (kWh) | 1.520,5 | 2.001,9 | 3.152,9 | 4.715,4 | 8.880,2 |
| SCOP Promedio Sistema | 2,7 | 2,7 | 2,6 | 2,5 | 2,3 |
| Energía picos de Potencia (kWh) | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 174,2 |
| Energía para picos de Potencia (h) | 0 | 0 | 0 | 0 | 221 |

**Tabla 58. Resultados para escenarios alternativos al cambiar la localización MFH**

| | Resultados para localizaciones alternativas en SFH | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Sevilla | Referencia Bilbao | Madrid | Bruselas | Estocolmo |
| Demanda Calefacción (kWh) | 5.023,8 | 7.846,2 | 15.233,0 | 28.929,0 | 53.228,5 |
| Demanda ACS (kWh) | 2.324,0 | 2.469,0 | 2.454,5 | 2.638,5 | 2.793,5 |
| Producción Fachada Solar (kWh) | 5.614,0 | 5.885,0 | 8.279,5 | 8.547,3 | 10.111,0 |
| Producción sup. Fachada (kWh/m$^2$) | 311,9 | 326,9 | 460,0 | 474,8 | 10 |
| Rendimiento Fachada | 25% | 35% | 38% | 62% | 59% |
| Fracción Solar ACS | **100%** | **100%** | **100%** | **100%** | **100%** |
| Fracción Solar Calefacción | 45% | 38% | 36% | 31% | 27% |
| Fracción Solar anual Promediada | 71% | 54% | 45% | 27% | 18% |
| Sobreproducción (kWh) | 409,6 | 281,5 | 241,2 | 72,9 | 33,6 |
| Rel. Sobreproducción / Demanda | 6% | 3% | 1% | 0% | 0% |
| Temperatura exterior promedio (°C) | 18,1 | 15,1 | 13,9 | 9,7 | 5,2 |
| Electricidad Sist. Bomba Calor (kWh) | 3.129,7 | 4.758,2 | 8.629,9 | 17.030,2 | 31.925,2 |
| SCOP Promedio Sistema | 2,6 | 2,5 | 2,4 | 2,1 | 2,0 |
| Energía picos de Potencia (kWh) | 50,1 | 252,0 | 1.558,5 | 5.335,7 | 19.659,0 |
| Energía para picos de Potencia (h) | 73 | 212 | 906 | 1.970 | 3.880 |

**Tabla 59. Resultados para escenarios alternativos al cambiar la localización SFH**

Los aspectos más destacables en cuanto al sistema de fachada activa son:

- El aumento de la demanda al cambiar la ubicación implica que, para localizaciones más al norte, se requiera más calor para cubrir las necesidades de ACS y, de forma más intensa, para la calefacción. Este incremento en la demanda implica un aumento en la producción de la fachada solar, pero también se aprecia el efecto de la mayor radiación incidente en el plano vertical de la fachada a medida que aumenta la latitud.
- Los niveles de producción por superficie de fachada sufren variaciones muy significativas pasando, en el caso de MFH, de los 195,1 kWh/m$^2$ en Sevilla a los 444 kWh/m$^2$ de Estocolmo. Para SFH los valores respectivos son 311,9 kWh/m$^2$ y 561,7 kWh/m$^2$. Estas producciones suponen rendimientos de 15 – 47 % para MFH y de 25 – 62 % para SFH.
- De nuevo, las fracciones alcanzadas para ACS superan en todos los casos el 100% y, para la calefacción, la fracción solar varía en un rango de 39 – 46 % para MFH, lo que supone una fracción solar de 41 – 79 % de la demanda total. En el caso de SFH las variaciones en la fracción solar son mayores para calefacción: 27 – 45 %, lo que implica una fracción solar de 18 – 71 % sobre el total.
- En cuanto a la sobreproducción, en el caso de MFH se da una sobreproducción de 409,4 kWh anuales que implican un 15 % de la demanda total. Para la SFH la mayor sobreproducción son 343 kWh y un 9 % al año.

Los aspectos más destacables para el sistema de producción son:

- El consumo anual de electricidad para MFH varía entre 1.520,5 kWh para Sevilla y 8.880,2 kWh para Estocolmo, representando un COP medio estacional del sistema de 2,7 y 2,3 respectivamente. En el caso del MFH únicamente se dan picos de producción de la bomba de calor en Estocolmo, requiriendo 174,2 kWh para un total de 221 horas.
- El consumo anual de electricidad para SFH varía entre 3.129,7 kWh y 31.925,2 kWh, dando lugar a un COP medio estacional del sistema de 2,6 y 2,0. En este caso se dan picos de producción en todas las localizaciones, con valores bastante elevados en el caso de Bruselas y Estocolmo, requiriendo una energía adicional de 5.335,7 kWh anuales durante 1970 horas y de 19.659 kWh y 3.880 horas respectivamente. En estos dos casos y, probablemente también en el caso de Madrid, resulta necesaria una bomba de calor de mayor capacidad para cubrir la demanda de la vivienda.

| | Resultados para ocupaciones y ganancias internas alternativas en MFH | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Nivel de Ocupación | | | | Ganancias Internas | |
| | Bajo | Medio – Ref. | Alto | Muy Alto | Bajas | Altas |
| Demanda Calefacción (kWh) | 3.283,5 | 2.481,1 | 1.287,5 | 345,1 | 3.066,0 | 1.119,0 |
| Demanda ACS (kWh) | 617,2 | 2.469,0 | 6.172,5 | 12.344,9 | 2.469,0 | 2.469,0 |
| Producción Fachada Solar (kWh) | 5.702,9 | 3.975,9 | 4.637,8 | 9.333,5 | 4.284,5 | 3.356,5 |
| Producción sup. Fachada (kWh/m$^2$) | 316,8 | 220,9 | 257,7 | 518,5 | 238,0 | 186,5 |
| Rendimiento Fachada | 34% | 24% | 28% | 56% | 26% | 20% |
| Fracción Solar ACS | **100%** | **100%** | 69% | 76% | **100%** | **100%** |
| Fracción Solar Calefacción | 55% | 43% | 18% | 1% | 38% | 34% |
| Fracción Solar anual Promediada | 69% | 74% | 62% | 74% | 72% | 83% |
| Sobreproducción (kWh) | 2.994,7 | 308,0 | 0,0 | 0,0 | 277,8 | 370,7 |
| Rel. Sobreproducción / Demanda | 77% | 6% | 0% | 0% | 5% | 10% |
| Electricidad Sist. Bomba Calor (kWh) | 1.943,1 | 2.001,9 | 2.607,3 | 4.258,4 | 2.284,2 | 1.346,3 |
| SCOP Promedio Sistema | 2,3 | 2,7 | 2,9 | 3,0 | 2,6 | 2,8 |
| Energía picos de Potencia (kWh) | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| Energía para picos de Potencia (h) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

**Tabla 60. Resultados para escenarios alternativos al variar ocupación y ganancias internas MFH**

El tercer aspecto considerado para valorar modificaciones en la demanda, representan una serie de alternativas en la ocupación, cuyos resultados se presentan en las Tabla 60 y **Tabla 61**.

| | Resultados para ocupaciones y ganancias internas alternativas en SFH | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Nivel de Ocupación | | | | Ganancias Internas | |
| | Bajo | Medio – Ref. | Alto | Muy Alto | Bajas | Altas |
| Demanda Calefacción (kWh) | 8.652,7 | 7.846,2 | 6.387,6 | 4.366,0 | 8.444,5 | 6.152,6 |
| Demanda ACS (kWh) | 617,2 | 2.469,0 | 6.172,5 | 12.344,9 | 2.469,0 | 2.469,0 |
| Producción Fachada Solar (kWh) | 7.490,9 | 5.885,0 | 6.623,3 | 10.191,0 | 6.097,8 | 5.368,7 |
| Producción sup. Fachada (kWh/m$^2$) | 416,2 | 326,9 | 368,0 | 566,2 | 338,8 | 298,3 |
| Rendimiento Fachada | 45% | 35% | 40% | 61% | 37% | 32% |
| Fracción Solar ACS | **100%** | **100%** | 78% | 81% | **100%** | **100%** |
| Fracción Solar Calefacción | 51% | 38% | 21% | 3% | 38% | 35% |
| Fracción Solar anual Promediada | 50% | 54% | 53% | 61% | 53% | 59% |
| Sobreproducción (kWh) | 2.842,3 | 281,5 | 0,0 | 0,0 | 271,1 | 310,5 |
| Rel. Sobreproducción / Demanda | 31% | 3% | 0% | 0% | 2% | 4% |
| Temperatura exterior promedio (°C) | 15,1 | 15,1 | 15,1 | 15,1 | 15,1 | 15,1 |
| Electricidad Sist. Bomba Calor (kWh) | 5.258,1 | 4.758,2 | 5.091,1 | 6.121,4 | 5.056,6 | 3.815,8 |
| SCOP Promedio Sistema | 2,2 | 2,5 | 2,7 | 2,8 | 2,5 | 2,5 |
| Energía picos de Potencia (kWh) | 270,5 | 252,0 | 218,7 | 176,7 | 300,5 | 139,1 |
| Energía para picos de Potencia (h) | 221 | 212 | 191 | 158 | 247 | 135 |

**Tabla 61. Resultados para escenarios alternativos al variar ocupación y ganancias internas MFH**

Los aspectos más destacables en cuanto al sistema de fachada activa son:

- El aumento de la ocupación afecta a las dos demandas de forma opuesta. Mientras que las necesidades de ACS aumentan con la ocupación, las mayores ganancias internas por ocupación implican una reducción de la demanda de calefacción. En términos generales se mantiene la tendencia de que el aumento de la demanda total represente un aumento de la producción solar de la fachada. Si el aumento de la demanda total se da como consecuencia de unos valores de ganancias internas bajas, debido a menores cargas, pesar de mantener la misma ocupación, el fenómeno que se aprecia es análogo al del incremento de la ocupación.
- Asimismo, si se reduce la demanda aumentando los factores de ganancias internas, debidas a los equipos y el calor metabólico de los ocupantes, pero, sin variar el número de personas que ocupan la vivienda, se aprecia un descenso en la producción de la fachada activa.
- Para la MFH, los niveles de producción por superficie de fachada van desde 220,9 kWh/m$^2$ para el caso de referencia y una ocupación de 4 personas, hasta los 518,5 kWh/m$^2$ cuando se consideran 20 personas. Si se aumentan las cargas internas al valor máximo planteado, la producción de la fachada se reduce hasta 186,5 kWh/m$^2$. Para SFH los valores respectivos son 326,9 kWh/m$^2$ para el caso de referencia y 566,2 kWh/m$^2$ para la ocupación máxima, quedando el caso de ganancias máximas en un valor de 298,3 kWh/m$^2$. Estas producciones suponen rendimientos de 20 – 56 % para MFH y de 32 – 61 % para SFH.
- En este caso se dan escenarios en los que no se alcanza a cubrir fracciones solares del 100% cuando se incrementa el número de ocupantes a niveles de ocupación alto o muy alto. La primera conclusión de esta situación es que desaparece la sobreproducción que se da en los meses de verano puesto que, en ese periodo que es el de menor demanda de calor en todos los casos, se aprovecha toda la energía captada. De esta forma, en el caso de MFH, la fracción solar de ACS se llega reducir hasta el 69 % dando una fracción

solar promediada de 62 %, mientras que en el SFH la menor fracción solar de ACS se queda en un 78 % para un promedio total del 53 %.

- En términos generales el mayor aprovechamiento de energía solar, mayor producción y mejor rendimiento de la fachada se da cuando se consiguen fracciones solares de ACS muy altas, cercanas al máximo, pero sin llegar al 100% para evitar sobreproducciones en verano.
- Cuando se da cierta sobreproducción, los valores mayores se dan con una ocupación baja de la vivienda, alcanzando un valor de 2.994,7 kWh anuales que implican un 77% de la demanda total para MFH y de 2.842,3 kWh para SFH, que representan un 31% de la demanda anual.

Por otro lado, los aspectos más destacables para el sistema de producción son:

- Los escenarios de máxima demanda de ACS, además de un mayor aprovechamiento de la energía solar a través de la fachada activa, proporcionan también COPs mayores a la bomba de calor, puesto que éste es más favorable a la producción de ACS que la producción de calor (Tabla 38). Esto implica un COP máximo de 3,0 y mínimo de 2,3 para MFH y un máximo de 2,8 y mínimo de 2,2 para SFH.
- El consumo anual de electricidad para MFH varía entre 1.346,3 kWh cuando las ganancias internas son más altas y de 4.258,4 kWh cuando la ocupación es mayor, siendo estos valores respectivos de 3.815,8 kWh y 6.121,4 kWh anuales para SFH.
- En el caso de MFH, no se dan picos de producción de la bomba de calor que sí ocurren para el SFH, variando entre 139,1 kWh y 135 horas anuales para el caso de ganancias mayores y 300,5 y 247 horas para el caso con ganancias menores. Es decir, el elemento que más afecta en este caso a los picos de producción son los factores que se adoptan para estimar las ganancias internas.

### 5.1.2. Factores que afectan a la producción

A diferencia del caso anterior, en este apartado se van a analizar los factores que afectan a la producción. Como la producción se calcula para una demanda dada y, por la forma en la que se ha planteado el cálculo, la producción no afecta a la demanda, algo que sí ocurre en sentido opuesto, la demanda va a permanecer invariable en los diferentes escenarios planteados a continuación.

De esta forma, se presentan los resultados al variar los parámetros que definen el sistema activo de fachada. Como la demanda permanece constante, los resultados para el sistema por bomba de calor también se mantienen en todos los casos, siendo únicamente los resultados para la fachada activa los que se ven modificados.

| | Resultados para fachadas solares alternativas en MFH | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Superficie Activa al Sur | | | | | Orientación | |
| | 6 m² | 12 m² | Ref. 18m² | 24 m² | 30 m² | Oeste | Este |
| Demanda Calefacción (kWh) | | | | 2.481,1 | | | |
| Demanda ACS (kWh) | | | | 2.469,0 | | | |
| Producción Fachada Solar (kWh) | 1.325,3 | 2.650,6 | 3.975,9 | 5.301,2 | 6.626,5 | 3.768,6 | 3.765,3 |
| Producción sup. Fachada (kWh/m²) | 220,9 | 220,9 | 220,9 | 220,9 | 220,9 | 209,4 | 209,2 |
| Rendimiento Fachada | 24,0% | 24,0% | 24,0% | 24,0% | 24,0% | 28,7% | 27,7% |
| Fracción Solar ACS | 50,6% | 88,8% | **100,0%** | **100,0%** | **100,0%** | **100,0%** | **100,0%** |
| Fracción Solar Calefacción | 1,7% | 10,2% | 43,5% | 66,8% | 75,0% | 38,6% | 38,5% |
| Fracción Solar anual Promediada | 26,8% | 53,5% | 74,1% | 87,8% | 95,6% | 70,1% | 69,9% |
| Sobreproducción (kWh) | 0,0 | 0,0 | 308,0 | 956,0 | 1.895,4 | 300,9 | 303,1 |
| Rel. Sobreproducción / Demanda | 0,0% | 0,0% | 6,2% | 19,3% | 38,3% | 6,1% | 6,1% |
| Electricidad Sist. Bomba Calor (kWh) | | | | 2.001,9 | | | |
| SCOP Promedio Sistema | | | | 2,7 | | | |
| Energía picos de Potencia (kWh) | | | | 0,0 | | | |
| Energía para picos de Potencia (h) | | | | 0 | | | |

**Tabla 62. Resultados para escenarios alternativos modificando el sistema de fachad activa MFH**

| | Resultados para fachadas solares alternativas en SFH | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Superficie Activa al Sur | | | | | Orientación | |
| | 6 m² | 12 m² | Ref. 18m² | 24 m² | 30 m² | Oeste | Este |
| Demanda Calefacción (kWh) | | | | 7.846,2 | | | |
| Demanda ACS (kWh) | | | | 2.469,0 | | | |
| Producción Fachada Solar (kWh) | 1.961,7 | 3.923,3 | 5.885,0 | 7.846,6 | 9.808,3 | 5.367,6 | 5.360,1 |
| Producción sup. Fachada (kWh/m²) | 326,9 | 326,9 | 326,9 | 326,9 | 326,9 | 298,2 | 297,8 |
| Rendimiento Fachada | 35,5% | 35,5% | 35,5% | 35,5% | 35,5% | 40,9% | 39,4% |
| Fracción Solar ACS | 62,6% | 90,8% | **100,0%** | **100,0%** | **100,0%** | **100,0%** | **100,0%** |
| Fracción Solar Calefacción | 3,4% | 15,2% | 37,9% | 57,9% | 68,5% | 33,1% | 33,0% |
| Fracción Solar anual Promediada | 19,0% | 38,0% | 54,3% | 68,0% | 78,0% | 49,4% | 49,3% |
| Sobreproducción (kWh) | 0,0 | 0,0 | 281,5 | 827,2 | 1.764,2 | 276,9 | 279,2 |
| Rel. Sobreproducción / Demanda | 0,0% | 0,0% | 2,7% | 8,0% | 17,1% | 2,7% | 2,7% |
| Electricidad Sis. Bomba Calor (kWh) | | | | 4.758,2 | | | |
| SCOP Promedio Sistema | | | | 2,5 | | | |
| Energía picos de Potencia (kWh) | | | | 252,0 | | | |
| Energía para picos de Potencia (h) | | | | 212 | | | |

**Tabla 63. Resultados para escenarios alternativos modificando el sistema de fachad activa SFH**

En este caso el análisis comparativo se realiza únicamente para valorar las diferencias en cuanto al sistema de fachada solar. Los aspectos más destacables son:

- La producción solar total y las fracciones solares que resultan de dicha producción son directamente proporcionales a la superficie de paneles activos. A mayor superficie, mayor producción y fracción solar. Esto implica que, por debajo de una superficie dada, no se alcance a cubrir toda la demanda de ACS, la fracción solar sea menor del 100 % y, como consecuencia, no se dé ninguna sobreproducción.
- En orientación sur el rendimiento y producción solar por unidad de superficie se mantiene constante. A pesar de que el rendimiento se incrementa en las orientaciones este y oeste, ambas con resultados muy similares, la producción total en esos planos se reduce ligeramente debido a que la radiación que incide en esas orientaciones es algo menor.
- La consecuencia de esta producción menor en orientación este y oeste, son fracciones solares algo menores, junto con una sobreproducción también inferior.
- En el caso de MFH, con 30 m² de panel se puede llegar a alcanzar un 95,6 % de fracción solar para la demanda total, pero esto implica una sobreproducción del 38,3 % de la demanda. Con esa misma superficie de fachada solar, en SFH se consigue una fracción del 78 % del total con una sobreproducción del 17,1 %.

- En el otro extremo, con 6 $m^2$ de fachada activa, la fracción solar para ACS se queda en un 50,6 %, 26,8% del total para MFH. En el caso de SFH, la fracción para ACS es de 62,6 % y 19,0% del total.

De forma complementaria, se describen a continuación (Tabla 64 y Tabla 65) los resultados para las alternativas al sistema de producción. Para este último caso planteado, todos los factores analizados previamente (demandas y sistema de fachada activa) permanecen invariables y, como consecuencia, únicamente se aprecian diferencias en el sistema de producción de calor con bomba de calor.

| | Resultados para sistemas de producción alternativos en SFH | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Referencia $COP_{min}$ y 6 kW | $COP_{Max}$ y 6 kW | $COP_{min}$ y 3 kW | $COP_{min}$ y 12 kW |
| Demanda Calefacción (kWh) | | 2.481,1 | | |
| Demanda ACS (kWh) | | 2.469,0 | | |
| Producción Fachada Solar (kWh) | | 3.975,9 | | |
| Producción sup. Fachada (kWh/$m^2$) | | 220,9 | | |
| Rendimiento Fachada | | 24,0% | | |
| Fracción Solar ACS | | **100,0%** | | |
| Fracción Solar Calefacción | | **43,5%** | | |
| Fracción Solar anual Promediada | | **74,1%** | | |
| Sobreproducción (kWh) | | 308,0 | | |
| Rel. Sobreproducción / Demanda | | 6,2% | | |
| Electricidad Sis. Bomba Calor (kWh) | 2.001,9 | 1.231,8 | 2.001,9 | 2.001,9 |
| SCOP Promedio Sistema | 2,7 | 4,0 | 2,7 | 2,7 |
| Energía picos de Potencia (kWh) | 0,0 | 0,0 | 6,7 | 0,0 |
| Energía para picos de Potencia (h) | 0 | 0 | 31 | 0 |

**Tabla 64. Resultados para sistemas de producción alternativos SFH**

| | Resultados para sistemas de producción alternativos en MFH | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Referencia $COP_{min}$ y 6 kW | $COP_{Max}$ y 6 kW | $COP_{min}$ y 3 kW | $COP_{min}$ y 12 kW |
| Demanda Calefacción (kWh) | | 7.846,2 | | |
| Demanda ACS (kWh) | | 2.469,0 | | |
| Producción Fachada Solar (kWh) | | 5.885,0 | | |
| Producción sup. Fachada (kWh/$m^2$) | | 326,9 | | |
| Rendimiento Fachada | | 35,5% | | |
| Fracción Solar ACS | | **100,0%** | | |
| Fracción Solar Calefacción | | **37,9%** | | |
| Fracción Solar anual Promediada | | **54,3%** | | |
| Sobreproducción (kWh) | | 281,5 | | |
| Rel. Sobreproducción / Demanda | | 2,7% | | |
| Electricidad Sis. Bomba Calor (kWh) | 4.758,2 | 2.557,0 | 4.758,2 | 4.758,2 |
| SCOP Promedio Sistema | 2,5 | 4,0 | 2,5 | 2,5 |
| Energía picos de Potencia (kWh) | 252,0 | 252,0 | 2125,6 | 0,0 |
| Energía para picos de Potencia (h) | 212 | 212 | 1179 | 0 |

**Tabla 65. Resultados para sistemas de producción alternativos MFH**

Puesto que la demanda y el sistema activo se mantienen iguales, las fracciones solares y la sobreproducción tampoco varían. Esto implica que únicamente se produzcan cambios en la electricidad consumida (proporcional al cambio de los valores de COP promedio) y en los picos de potencia (asociados al valor de potencia máxima de la bomba de calor).

- Para SFH la electricidad mínima consumida implica 1.231,8 kWh anuales (14,4 kWh/$m^2$) y únicamente se da una carencia de energía de 6,7 kWh anuales durante 31 horas, cuando la capacidad máxima de este equipo es de 3 kW, por lo que resulta viable emplear una bomba de estas características para este caso.

- Para MFH la electricidad mínima consumida implica 2.557,0 kWh anuales (23,25 kWh/m$^2$). En este caso, la bomba de calor de 3 kW resulta insuficiente y se puede valorar bien, la opción de 12 kW que cubre suficientemente, o el caso de referencia con 6 kW y un déficit de 252 kW al año durante 212 horas.

## 5.2. Discusión de los resultados

El análisis descrito se ha planteado para contemplar escenarios de edificación a los que se incorpora, como una alternativa a los sistemas convencionales, el sistema completo de panel solar activo acoplado a la bomba de calor. De esta forma, se pretende elevar la contribución de fuentes renovables, gracias a que se consigue aprovechar una cantidad significativa de energía solar que permite cubrir las necesidades de la vivienda.

El enfoque planteado ha consistido en un cálculo simplificado con dos factores principales: la demanda y la producción energética. El análisis de estos dos y la relación que se da entre ambos permite analizar los resultados para diferentes escenarios. Puesto que el objeto principal del estudio es el novedoso sistema de fachada solar, el análisis se orienta especialmente a las consideraciones de este componente.

Por tanto y, tal y como se había concluido en el Capítulo IV, existe una clara dependencia entre el rendimiento de la fachada y la demanda del edificio que implica una producción de calor del conjunto. Esto que, es algo común para la mayoría de los sistemas solares como el propuesto, ha podido ser caracterizado de forma específica según la ecuación (44), en la cual se aprecia la relación entre el rendimiento de la fachada, la energía producida y la radiación solar incidente.

En términos generales, una mayor demanda implica mejor rendimiento de la fachada solar y una mayor producción solar, llegando a alcanzar rendimientos de hasta un 50 – 60% para la fachada cuando la ocupación es muy alta o en localizaciones del norte de Europa. En estos casos en los que la demanda es considerable, se puede conseguir producciones por unidad de superficie de fachada de más de 500 kWh/m$^2$ y año (Tabla 59, Tabla 60 y Tabla 61), lo que implica una producción muy relevante, en un orden de magnitud similar al de los colectores solares planos vidriados. En términos generales, demandas elevadas para viviendas en climas fríos, poco aisladas, casas grandes y expuestas al exterior, implican buenos resultados en cuanto a energía solar producida por la fachada solar.

En cualquier caso, los resultados para los casos de referencia (Tabla 47) con rendimientos para la fachada solar de 35 % y 24 % y producciones respectivas de 326,94 kWh/m$^2$ y 220,88 kWh/m$^2$ para SFH y MFH, también resultan ser muy meritorios y de interés para aplicaciones como las planteadas, puesto que las fracciones solares alcanzadas implican un 100% de las necesidades de ACS y cubren más de la mitad de la demanda total de la vivienda.

Sin embargo, mayores demandas implican mayor consumo de energía, a pesar de que sea renovable, lo que, en términos generales, contradice la filosofía de edificios sostenibles y de consumo muy bajo, nulo o positivo, para los que la premisa fundamental consiste en adoptar, como primera medida, una reducción máxima de la demanda.

Por otro lado, la tipología de las dos cargas consideradas requiere consideraciones diferentes. Una vivienda bien diseñada y convenientemente aislada, puede llegar a alcanzar valores muy bajos para la demanda de calefacción en invierno, sin embargo, la demanda de ACS seguirá

siendo relevante y, para la aplicación residencial planteada, con un patrón bastante estable a lo largo del año. Por tanto, la estrategia planteada para priorizar cubrir la demanda de ACS primero y emplear la energía sobrante para la calefacción, resulta adecuada para el caso considerado. Pero con esta aproximación también se dan ciertas restricciones cuando, en los meses de verano, únicamente existe demanda de ACS y, si se supera la fracción solar del 100% aparece la sobreproducción que, en la práctica, implica captar energía solar que luego no puede ser aprovechada.

El diseño del sistema tomando en consideración la sobreproducción es una de las conclusiones más relevantes del estudio. Se debe alcanzar un equilibrio entre el verano en el que, únicamente se produce agua para ACS y el invierno, en el que se requiere una importante cantidad de agua caliente para calefacción. Si se pretende cubrir toda la demanda combinada, ACS y calefacción, con el sistema solar, la sobreproducción en verano resulta muy elevada. Se debe establecer un equilibrio entre fracción solar y sobreproducción para evitar un derroche excesivo de energía. A este respecto resulta de interés, también, analizar escenarios diferentes del residencial en los que se pueda contemplar otras relaciones diferentes entre las dos demandas analizadas.

En este punto, resultan interesantes soluciones configurables con las que, por ejemplo, se puedan activar y desactivar paneles en función de la época del año, habilitando más paneles en invierno cuando es requiere mayor producción y reduciendo la superficie de fachada activa en verano para evitar la sobreproducción. Otra alternativa son los sistemas y depósitos de acumulación estacionales [330].

En cuanto a la cantidad y disponibilidad de radiación vinculada a la localización y la posición en el plano de fachada, los resultados indican que cuanto mayor sea la latitud, mayor aprovechamiento se consigue de la fachada solar. Por tanto, este sistema no resulta tan interesante para localizaciones con climas calurosos. Para las orientaciones este y oeste, ambas tienen un comportamiento muy similar con producciones netas algo menores a la orientación sur, pero, con un mayor rendimiento de la fachada activa.

Al valorar las diferencias entre viviendas individuales unifamiliares (SFH) y viviendas residenciales colectivas o multifamiliares (MFH), se aprecia cómo en las primeras las mayores demandas permiten un mejor aprovechamiento del sistema solar. Sin embargo, la complementariedad e interacción que se puede conseguir entre diferentes viviendas en edificios colectivos, con sistemas de producción centralizados, tienen un gran potencial para el sistema propuesto.

Respecto al sistema completo con la bomba de calor, se ha adoptado un enfoque muy básico contemplando el funcionamiento del conjunto mediante valores de COP estacionarios medios. Por la propia conceptualización, cuanto mejores sean esos rendimientos, menor será el consumo eléctrico del sistema, obteniendo soluciones más eficientes. Se han identificado en el transcurso de la investigación algunas pautas en la gestión y diseño del sistema que permiten elevar el rendimiento. Ente otras, el sistema planteado implica que toda la energía del sistema solar debe pasar por la bomba de calor sin que haya posibilidad de “puentear o eludir” la bomba algo que, sin duda, permitiría alcanzar mejores valores de COP para el conjunto.

Finalmente, la capacidad máxima de la bomba de calor y el empleo de un sistema de respaldo debe ser tenido en consideración para establecer un dimensionamiento adecuado. El equipo de 6 kW de potencia máximo planteado para los casos de referencia puede ser de interés para la SFH, aunque requiere cierta energía adicional para cubrir picos durante 212 horas, pero para la MFH un equipo con la mitad de potencia cubre convenientemente los picos de potencia.

En definitiva, el estudio planteado ha permitido comprender mejor las implicaciones del dimensionamiento y adecuación del sistema propuesto, valorando el impacto de las diferentes alternativas en el comportamiento energético del edificio. Tal y como se ha comentado se debe establecer una correcta sincronización entre el equipo de producción y el edificio, buscando que el sistema solar esté funcionando la mayor parte del tiempo para que consiga el máximo aprovechamiento de energía. Se ha podido comprobar la importancia de la gestión del sistema, para lo que se debe analizar el proceso completo de captación, almacenamiento y consumo de esa energía, en un proceso continuo e ininterrumpido, que permite obtener valores importantes de producción, de rendimientos de la fachada solar y de la bomba de calor y, en definitiva, persiguiendo una reducción del consumo gracias a un mayor aprovechamiento de la energía renovable.

## 5.3. Escenarios alternativos complementarios

Para concluir con el estudio de alternativas, en este apartado se van a valorar una serie de escenarios complementarios para dar respuesta a algunas de las cuestiones comentadas en el punto anterior, con el objetivo de obtener una representación más completa y realista de las capacidades de la solución.

Así, se van a tomar los escenarios de referencia y se van a adaptar para obtener soluciones más ajustadas, valorando también un escenario de uso diferente, como puede ser un edificio polideportivo, en el que toda la producción solar se destina a la demanda de ACS. Se trataría, en este caso, de asimilar dentro del estudio únicamente un uso diferente al residencial que afecta a la producción de ACS, pero que considera que no varían el resto de los factores definidos.

Las consideraciones que se van a adoptar para los escenarios residenciales son las siguientes:

- Se asume un escenario de rehabilitación del caso de referencia. Se mantienen las características principales de las viviendas, pero, se consideran fachadas en las que el valor U del conjunto se reduce debido a la contribución del aislamiento del panel sándwich adherido al muro. Se considera que las ventanas han sido renovadas por soluciones más actuales. Como consecuencia de esto, los valores contemplados serán: $U_{Fac}$ = 0,4 W/m$^2$K y $U_{Ven}$ = 1,5 W/m$^2$K.
- Por otro lado, dado que en los casos de referencia se daba cierta sobreproducción en verano, se reduce la superficie de paneles activos a 15 m$^2$, para quedar ligeramente por debajo de la fracción solar del 100 % para ACS y evitar la sobreproducción.
- Como alternativa al caso anterior, se contempla una situación en la que se busca alcanzar una fracción solar combinada de ACS y calefacción plena, para lo que se va a estimar la cantidad de superficie activa en cada caso, permitiendo también valorar la sobreproducción que resulta en ese caso.
- Para la bomba de calor se van a asumir en todos los casos los COP máximos y se va a ajustar la potencia máxima de la bomba a 3 kW para MFH dejando la de SFH en 6kW.

Las consideraciones que se van a adoptar para los escenarios terciarios son las siguientes:

- Puesto que la demanda de calefacción tiene otras implicaciones, se va a considerar únicamente una carga de ACS, asumiendo que el sistema solar se emplea sólo para este

fin. De esta forma se puede valorar el caso más favorable, pero también más estable en el que el ACS cobra el mayor protagonismo, frente a otros en los que es la calefacción la predominante, o situaciones de equilibrio entre ambos. Así, las características del edificio no afectan al cálculo puesto que la demanda de ACS no depende de estos factores. Los parámetros relevantes serán la ocupación, ubicación y superficie de paneles, asumiendo que, al variar la ocupación, se están considerando usos diferentes al residencial.

Los resultados que se obtienen, al comparar el caso de referencia (REF) y el caso residencial rehabilitado propuesto (REH) en el que, se han considerado 15 $m^2$ de panel activo y bombas de calor de 6 kW par SFH y de 3 kW para MFH con COP máximo, son los descritos a continuación.

| | SFH – REF | SFH – REH | MFH – REF | MFH – REH |
|---|---|---|---|---|
| Demanda Calefacción (kWh) | 7.846,2 | 5.443,7 | 2.481,1 | 1.265,1 |
| Demanda ACS (kWh) | 2.469,0 | 2.469,0 | 2.469,0 | 2.469,0 |
| Producción Fachada Solar (kWh) | 5.885,0 | 4.419,4 | 3.975,9 | 2.804,9 |
| Producción Superficial Fachada (kWh/$m^2$) | 326,9 | 294,6 | 220,9 | 187,0 |
| Rendimiento Fachada | 35% | 32% | 24% | 20% |
| Fracción Solar ACS | **100%** | **99%** | **100%** | **99%** |
| Fracción Solar Calefacción | 38% | 23% | 43% | 14% |
| Fracción Sola anual Promediada | 54% | 55% | 74% | 73% |
| Sobreproducción (kWh) | 281,5 | 62,2 | 308,0 | 67,0 |
| Relación Sobreproducción / Demanda | 3% | 1% | 6% | 2% |
| Temperatura exterior promedio (°C) | 15,1 | 15,1 | 15,1 | 15,1 |
| Electricidad Sistema Bomba Calor (kWh) | 4.758,2 | 1.965,4 | 2.001,9 | 930,8 |
| SCOP Promedio Sistema (SFH = 6kW, MFH = 3kW) | 2,5 | 4,0 | 2,7 | 4,0 |
| Energía para picos de Potencia (kWh) | 252,0 | 19,1 | 0,0 | 0,0 |
| Energía para picos de Potencia (h) | 212 | 36 | 0 | 0 |

**Tabla 66. Resultados principales del sistema combinado, comparando sistema de referencia (REF), frente a un escenario de rehabilitación (REH) para unifamiliar (SFH) y residencial colectiva (MFH)**

Tal y como se puede apreciar el efecto del incremento en el aislamiento de la fachada es mucho mayor en el caso MFH, reduciendo la demanda de calefacción a cerca de la mitad, debido a que este caso está menos expuesto al exterior que el SFH en el que, además de la fachada, la cubierta y el forjado inferior también tienen una influencia muy importante. En cualquier caso, la reducción de la demanda para SFH también es relevante: un descenso del 30 %.

Esta reducción de la demanda implica una menor producción y rendimiento de la fachada solar por metro cuadrado. Sin embargo, la menor demanda junto con las fracciones solares para ACS ajustadas al 99 % dan como resultado una fracción anual promediada muy cercana a la del caso de referencia, por lo que la primera conclusión es que, a pesar de que el sistema de fachada activo no esté captando tanta energía ni obteniendo rendimientos mayores, el resultado en la aportación del sistema renovable al conjunto es prácticamente el mismo.

Asimismo, las sobreproducciones se reducen prácticamente al mínimo con 62 kWh y 67 kWh anuales y, el consumo de la bomba de calor disminuye en la misma proporción que el cambio realizado en el COP. El exceso de energía requerido para cubrir picos de potencia se reduce a 36 horas y 19,1 kWh anuales para SFH y es nulo para MFH.

Si, frente a este escenario de vivienda rehabilitada, se plantea el caso en el que se pretende cubrir el 100 % de la demanda combinada para ACS y calefacción con el sistema propuesto, el resultado principal son las sobreproducciones que se presentan en la Tabla 67 siguiente, para las superficies de fachada solar requeridas en cada caso.

| | SFH – REH | SFH – 100% | MFH – REH | MFH – 100% |
|---|---|---|---|---|
| Demanda Calefacción (kWh) | 5.443,7 | | 1.265,1 | |
| Demanda ACS (kWh) | 2.469,0 | | 2.469,0 | |
| Superficial Fachada Solar ($m^2$) | 15 | 60 | 15 | 36 |
| Producción Fachada Solar (kWh) | 4.419,4 | 17.677,7 | 2.804,9 | 6.731,8 |
| Producción Superficial Fachada (kWh/$m^2$) | 294,6 | | 187,0 | |
| Rendimiento Fachada | 32% | | 20% | |
| Fracción Solar ACS | **99%** | **100%** | **99%** | **100%** |
| Fracción Solar Calefacción | 23% | **100%** | 14% | **100%** |
| Fracción Sola anual Promediada | 55% | **99%** | 73% | **99%** |
| Sobreproducción (kWh) | 62,2 | 9.848,0 | 67,0 | 3.018,4 |
| Relación Sobreproducción / Demanda | 1% | **124%** | 2% | **81%** |

**Tabla 67. Resultados principales del sistema combinado, comparando sistema de referencia (REF), frente a un escenario de rehabilitación (REH), que cubre el 100% de la demanda completa, para unifamiliar (SFH) y residencial colectiva (MFH)**

Para alcanzar el 99 % de la demanda total en la SFH, se debe multiplicar por cuatro la superficie de fachada activa, dando lugar a una sobreproducción anual de 9.848,0 kWh, lo que representa el 124 % de la demanda total. Para MFH, se pasa de 15 a 36 $m^2$ y la sobreproducción alcanza un 81 % de la demanda: 3.018,4 kWh.

Si se comparan estos resultados con las recomendaciones establecidas por la Comisión Europea para edificios NZEB en la zona climática oceánica [331], en donde se establece una contribución de fuentes renovables mínima de un 54% en viviendas unifamiliares de nueva construcción, el resultado obtenido para SFH con fracciones superiores al 55%, cumple, en este escenario planteado, con la exigencia establecida.

Por tanto, el aumento de la superficie para captar más energía solar implica cubrir todas las necesidades del edificio, pero la consecuencia es un exceso de energía que no se puede aprovechar y que, si no hay ninguna forma de gestionar adecuadamente, va a generar un problema añadido.

Finalmente, al contemplar un escenario de demanda únicamente de ACS, el sistema resulta más sencillo de analizar. En este caso el tipo de edificio no tiene influencia por lo que no se dan diferencias en los casos de referencia SFH y MFH, puesto que la demanda queda fijada por el número de ocupantes y la ubicación. Al variar la cantidad de paneles activos en esta situación, se puede apreciar la relación que se da entre el incremento de la superficie de la fachada solar, la fracción solar cubierta por el sistema y la sobreproducción que se genera. Tal y como se puede apreciar en la Figura 131, la superficie óptima activa, que maximiza cubrir la demanda evitando que se den sobreproducciones, se sitúa en torno a los 15$m^2$, tal y como se ha considerado para el caso de rehabilitación (Tabla 66).

Si en vez de cuatro ocupantes como en el caso de anterior, se consideran 12 ocupantes, la superficie óptima de paneles se encuentra en torno a los 33 $m^2$.

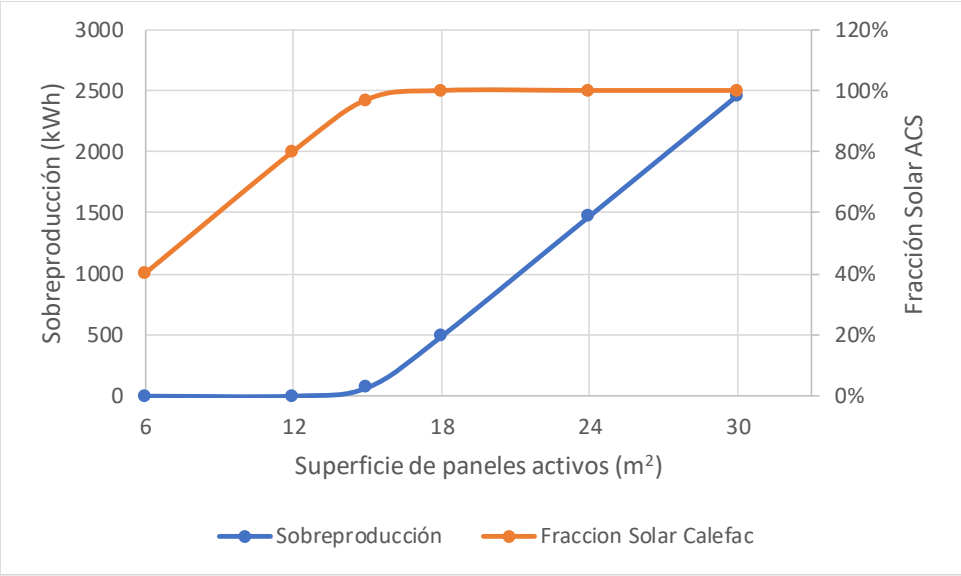



**Figura 131. Relación entre la superficie activa de paneles, la sobreproducción y la fracción solar de ACS para una vivienda con 4 ocupantes en Bilbao**

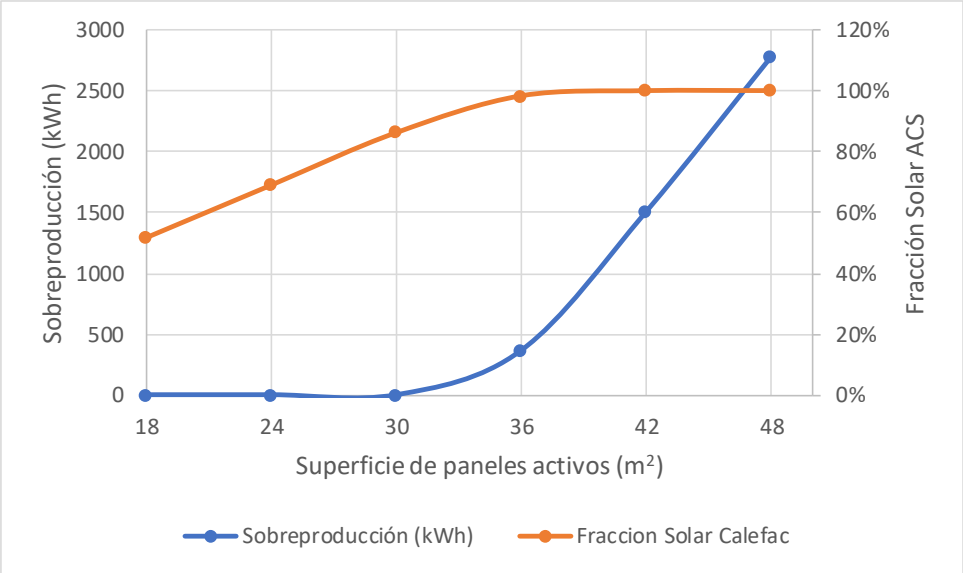



**Figura 132. Relación entre la superficie activa de paneles, la sobreproducción y la fracción solar de ACS para una vivienda con 12 ocupantes en Bilbao**

En este punto, sí que resulta importante tener en consideración la merma que se puede dar en el rendimiento de los paneles cuando se aumenta la superficie activa, aunque, si se plantean convenientemente conexiones en paralelo para baterías de superficie activa como los analizados en el capítulo IV (múltiplos de 6m$^2$), los rendimientos estimados sí pueden ser aceptados.

Por otro lado, al analizar la variación en el rendimiento de los paneles cuando se incrementa la demanda de ACS, proporcional al número de ocupantes y, considerando otra ubicación, Bruselas, además del caso de referencia de Bilbao, se aprecia una progresión como la descrita en la siguiente Figura 133.

En este caso, la progresión supone una relación lineal y proporcional entre la demanda y el número de ocupantes de la vivienda, siendo la pendiente algo superior en el caso de Bruselas, debido a las temperaturas menores de suministro del agua de red. Por otro lado, el rendimiento del panel y la producción solar que es proporcional a este rendimiento adopta una curva principalmente ascendente, pero con una progresión irregular. En cualquier caso, se destaca de nuevo el incremento significativo del rendimiento del panel cuando aumenta la demanda, tanto debido a necesidades mayores de ACS como al cambio de la ubicación, siendo más acusado el incremento en climas fríos, aspecto que se ha podido identificar también, de forma preliminar, en las etapas previas del estudio.

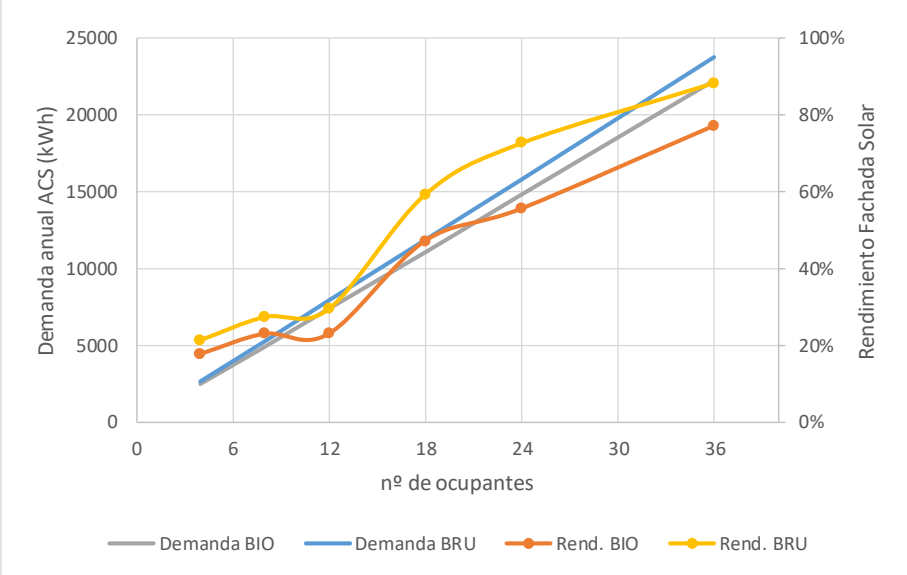



**Figura 133. Relación entre la ocupación de la vivienda, la demanda generada para ACS asociada a dicha ocupación y el rendimiento de la fachada activa para las localizaciones de Bilbao y Bruselas**

Cuando se analiza la superficie activa de paneles requerida para cubrir el 100% de la demanda, se obtiene una curva similar a la de la evolución del rendimiento (Figura 134).

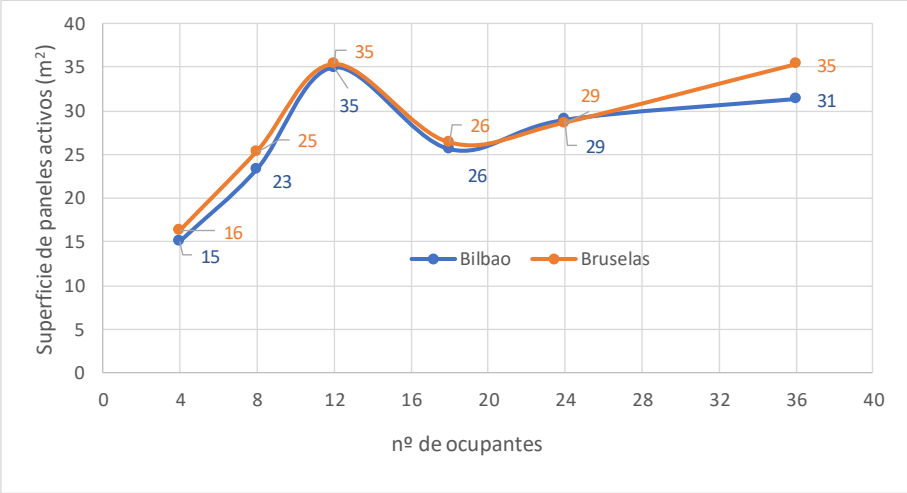



**Figura 134. Relación entre la ocupación de la vivienda y la superficie activa de paneles requerida para cubrir toda la demanda de ACS para las localizaciones de Bilbao y Bruselas**

# 6. BENEFICIOS DE LA SOLUCIÓN EN TÉRMINOS DE AHORRO ENERGÉTICO Y ECONOMICO

Tras los estudios presentados para el panel primero (capítulo III) y para el sistema después (capítulo IV), en este capítulo V se planteado un análisis del sistema completo estimando su comportamiento en un escenario de edificación. Gracias a la caracterización disponible se han podido plantear, valorar y cuantificar las implicaciones y el potencial de las fachadas solares para ser aplicadas en edificios rehabilitados y de nueva construcción.

Una vez desarrollado el análisis de alternativas en los que se han estimado rendimientos, producción y fracción solar y consumo de electricidad, en este apartado se van a cuantificar las implicaciones que dichos resultados tienen, tanto desde el punto de vista energético, como económico.

Se plantea un análisis en dos fases en el que se van a considerar las siguientes situaciones:

- Se analiza en primer lugar el caso de referencia (Tabla 47). Se toma la demanda y, se valoran las implicaciones que se dan al sustituir un sistema de producción con caldera de gas, frente a la propuesta del sistema combinando fachada solar y sistema de producción con bomba de calor.
- A continuación, se analiza la posibilidad de rehabilitar ese escenario de referencia (Tabla 66). En este caso, se valora la contribución del sistema en la rehabilitación, contemplando también el ahorro que el aislamiento térmico proporcionado por el panel aporta a la demanda de calefacción. A modo de contraste, se presenta también otra alternativa diferente al sistema de fachada solar y bomba de calor, planteando una rehabilitación con de paneles solares planos instalados en cubierta y una intervención de rehabilitación de la envolvente.

Para valorar los aspectos energéticos se van a tomar en consideración los siguientes factores de conversión de energía primaria [332] así como el coste de cada tipo de fuente energética [333]. Para simplificar el cálculo y, desde un punto de vista conservador, se consideran constantes y que no varían en el tiempo.

| | Electricidad | Gas |
|---|---|---|
| Factor Energía Primaria (kWh/kWh Primaria) | 2,368 | 1,195 |
| Coste (€ /kWh) | 0,22 | 0,1 |

**Tabla 68. Factores asociados a la sostenibilidad y coste de la energía para las dos fuentes consideradas**

Los resultados para el caso de referencia, proponiendo las dos alternativas, caldera y sistema solar con bomba de calor, para cubrir la demanda son los que se presentan a continuación.

| | | SFH – Referencia | MFH – Referencia |
|---|---|---|---|
| Demanda total (kWh/año) | | 10.315,2 | 4.950,1 |
| Sistema con bomba de calor | Electricidad consumida (kWh/año) | 4.537,6 | 2.001,9 |
| | Energía primaria (kWh/año) | 10.745,1 | 4.740,6 |
| | Coste energético (€/año) | 998,3 | 4.40,4 |
| Sistema con caldera | Gas consumido (kWh/año) | 11.461,3 | 5.500,1 |
| | Energía primaria (kWh/año) | 13.696,3 | 6.572,6 |
| | Coste energético (€/año) | 1.146,1 | 550,0 |

**Tabla 69. Resultados al comparar los edificios de referencia con dos sistemas de producción diferentes**

| | | SFH – Referencia | MFH – Referencia |
|---|---|---|---|
| Ahorro económico | Neto (€/año) | 147,9 | 109,6 |
| | Relativo (%/año) | 12,9% | 19,9% |
| Ahorro energético | Energía primaria neta (kWh/año) | 2.951,2 | 1.832,1 |
| | Relativo (%/año) | 21,5% | 27,9% |

**Tabla 70. Ahorros obtenidos con el sistema solar con bomba de calor frente al sistema por gas**

Tal y como se puede apreciar, el ahorro obtenido resulta todavía modesto puesto que se está considerando únicamente la producción para la misma demanda en ambas situaciones. Pero, tal y como se ha comentado en el apartado 5.3, la incorporación de material aislante a la fachada implica una reducción significativa de la demanda de calefacción, especialmente en el caso de MFH. Si se considera esa reducción en la demanda diferenciando el valor previo del posterior a la rehabilitación, los resultados son las indicados en la Tabla 71 siguiente.

| | | SFH | MFH |
|---|---|---|---|
| Demandas | Previa a la rehabilitación (kWh/año) | 10.315,2 | 4.950,1 |
| | Tras la rehabilitación (kWh/año) | 7.912,7 | 3.734,1 |
| Ahorro en la demanda | Neto (kWh/año) | 2.402,5 | 1.216,0 |
| | Relativo (%/año) | 23,3% | 24,6% |

**Tabla 71. Demanda previa y posterior a la rehabilitación y ahorro en la demanda obtenido**

Al comparar ambas situaciones, antes y después de la rehabilitación, el ahorro que se consigue al sustituir el sistema previo de caldera de gas, por el conjunto de fachada solar y bomba de calor, es el desglosado a continuación.

| | | SFH | MFH |
|---|---|---|---|
| Tras la rehabilitación: Sistema con bomba de calor | Electricidad consumida (kWh/año) | 1.984,5 | 930,8 |
| | Energía primaria (kWh/año) | 4.699,3 | 2.204,1 |
| | E. primaria superf. (kWh/ $m^2$ año) | 42,7 | 25,8 |
| | Coste energético (€/año) | 436,6 | 204,8 |
| Previo a la rehabilitación: Sistema con caldera | Gas consumido (kWh/año) | 11.461,3 | 5.500,1 |
| | Energía primaria (kWh/año) | 13.696,3 | 6.572,6 |
| | E. primaria superf. (kWh/ $m^2$ año) | 124,5 | 76,9 |
| | Coste energético (€/año) | 1.146,1 | 550,0 |
| Ahorro económico | Neto (€/año) | 709,5 | 345,2 |
| | Relativo (%/año) | 61,9% | 62,8% |
| Ahorro energético | Energía primaria neta (kWh/año) | 8.997,0 | 4.368,5 |
| | Relativo (%/año) | 65,7% | 66,5% |

**Tabla 72. Resultados al comparar la situación previa a la rehabilitación y tras la rehabilitación. Consumos y ahorros obtenidos con la intervención.**

En este caso se puede apreciar cómo del gasto asociado a la energía tanto para SFH como para MFH alcanza un valor cercano al 62%, con una reducción de la energía primaria de prácticamente dos tercios del caso previo a la rehabilitación.

Al contemplar, al igual que en el apartado 5.3, las recomendaciones de la comisión [331] para el consumo de NZEB en un clima oceánico y viviendas unifamilares, se establece un rango de energía primaria neta de 15-30 kWh/$m^2$ con una contribución de renovables de 35 kWh/$m^2$. La cantidad de energía solar obtenida por unidad de superficie se puede calcular con los resultados presentados en la Tabla 67, siendo 40,2 kWh/$m^2$ para MFH y 32,8 kWh/$m^2$ para SFH.

Por tanto y, a falta de considerar el consumo de energía debido a la iluminación que no se ha estimado en este caso, el escenario rehabilitado de SFH estará fuera del rango de la energía primaria (42,7 kWh/$m^2$) pero por encima de la contribución mínima de renovables requerida (40,2 kWh/$m^2$). Aunque no se plantea la comparación entre viviendas unifamiliares y residencial colectivas, si se contempla el escenario de MFH rehabilitada, esta se encuentra en la situación opuesta con 25,8 kWh/$m^2$ de energía primaria y 32,8 kWh/$m^2$ de contribución de renovables. A pesar de que ninguno de los dos escenarios cumple los dos requisitos a la vez, ambos se encuentran en unos niveles muy interesantes, más aún si se toma en consideración que, los valores comparados son para edificios de nueva construcción y no rehabilitados.

Por otro lado, la reciente actualización del DB-HE del CTE en 2019 [297], ha establecido para la zona C (correspondiente a Bilbao), un valor máximo de consumo de energía primaria no renovable de 32 kWh/$m^2$ anuales para nueva construcción y de 65 kWh/$m^2$ para reformas en edificios residenciales. Por lo que, si se asume que la iluminación y los electrodomésticos son relativamente modernos, los dos casos de rehabilitación planteados (MFH y SFH) cumplirían con las exigencias de este reciente requisito normativo ya que ambos cubren el 100% de la demanda de ACS con fuentes renovables.

Finalmente, si se comparan estos valores con la experiencia lleva a cabo en Austria [334], en la que se analizaron 19 "Casas Solares" concluyendo con fracciones solares de 66% y producciones de 312 kWh/m$^2$, cabe destacar que, para una fracción similar, la producción solar es significativamente menor en los escenarios de referencia analizados. Esta diferencia se debe a 1) la influencia de la zona climática, 2) la menor cantidad de superficie activa de paneles instalados y 3) la tecnología de colectores empleada, siendo, para el caso austríaco, soluciones de paneles vidriados. Si se toman en consideración otras localizaciones diferentes para el sistema analizado (Tabla 58 y Tabla 59), las producciones obtenidas se ven incrementadas a 70 – 93 kWh/m$^2$ para MFH y 70 – 93 kWh/m$^2$ para SFH para unas fracciones respectivas de 41 – 54% y 18 – 27%.

En este escenario, en el que el resultado de la rehabilitación proporciona resultados más relevantes, se puede plantear un sencillo cálculo para estudiar la inversión necesaria y el retorno de la inversión gracias a los ahorros anuales descritos en la Tabla 72. Para ello se considerarán los costes de inversión descritos a continuación, para los que se han empleado diferentes referencias para estimar el coste de los paneles de la fachada solar [335], [336] y la bomba de calor y elementos adicionales [333], [337], [338].

| | SFH | MFH* |
|---|---|---|
| Superficie de 15m$^2$ de fachada solar instalada (€) | 1.950 | 1.950 |
| Bomba de calor (€) | 4.200 | 1.700 |
| Depósito acumulación (€) | 850 | 300 |
| Instalación hidráulica complementaria (€) | 2.100 | 700 |
| Inversión Total (€) | **9.050** | **4.450** |
| Retorno de la inversión (años) | **12,7** | **12,9** |

*Para MFH, salvo la superficie de fachada que será la misma, se considera la parte proporcional del resto de componentes asumiendo un edificio en bloque con sistema centralizado

**Tabla 73. Coste e inversión de los elementos para la rehabilitación con sistema de fachada solar acoplado a bomba de calor**

El retorno de la inversión realizada al rehabilitar los dos edificios de referencia resulta similar, algo inferior a 13 años, si bien en el caso SFH la inversión necesaria es prácticamente el doble que para una vivienda situada en un edificio residencial colectivo, pero, al ser el ahorro también muy superior al del MFH, el balance de la operación resulta ser, en ambos casos, del mismo orden.

Como alternativa al sistema con fachada solar, se puede contemplar una rehabilitación en la que se aísla la envolvente del edificio con un sistema de fachada ventilada o SATE (correspondiente a la superficie cubierta por la facha solar del caso anterior) y, se instalan también paneles solares en cubierta que, al ser colectores planos vidriados de mayor potencia y tener una mejor orientación que la fachada, requieren menos superficie de captación. En el caso de MFH, se aplica, además, un coeficiente de simultaneidad con el resto de las viviendas lo que representa

también una menor superficie de colectores. Los costes e inversión en este caso serían los indicados a continuación.

| | SFH | MFH* |
|---|---|---|
| Instalación completa de colectores solares en cubierta incluyendo depósito e instalación hidráulica (€) | 7.200 | 5.700 |
| Aislamiento en fachadas | 1.500 | 1.500 |
| Inversión Total (€) | **8.700** | **7.200** |
| Retorno de la inversión (años) | **12,3** | **20,9** |

*Para MFH la superficie de colectores solares es un 25% menor que para SFH

**Tabla 74. Coste e inversión de los elementos para la rehabilitación aislando la fachada e instalando colectores solares vidriados en cubierta.**

Cuando se plantea esta alternativa, las diferencias que se dan para la SFH apenas tienen un impacto significativo, tanto en cuanto a la inversión como en el tiempo de retorno. Para MFH, la inversión requerida en este segundo caso resulta ser significativamente mayor que para el sistema con fachada solar, lo que implica también un retorno de la inversión un 38% menor que corresponde a 8 años más para recuperar la inversión que cuando se considera la solución con fachadas solares.

En cualquier caso, cabe destacar los siguientes aspectos asociados al estudio comparativo planteado para valorar los ahorros y beneficios del sistema propuesto:

- En ambos escenarios, fachada solar o colectores en cubierta, resulta necesario analizar otros factores técnicos además del económico y energético que pueden hacer inviable una, o, las dos soluciones. La disponibilidad de espacio en cubierta o fachada, orientación disponible, espacio para alojar el resto de los componentes del conjunto, o las distancias entre componentes, son algunas de las incompatibilidades más habituales.
- La gestión del sistema con colectores solares en cubierta, con mayores temperaturas de funcionamiento, picos de potencia y sobrecalentamientos más intensos, implican contar con elementos de seguridad adicionales y de control de la instalación que no se han tenido en cuenta.
- El análisis económico propuesto es un estudio básico y simplificado para el que no se han tenido en cuenta factores como subvenciones y ayudas o escenarios de evolución futura del precio de la energía.
- Los factores de escala asociados a los componentes en edificios residenciales colectivos (MFH), se han estimado para un edificio relativamente pequeño (8 viviendas). Cabe esperar que, cuanto mayor sea el edificio y mayor número de viviendas tenga, se obtengan mayores beneficios gracias al mejor aprovechamiento al compaginar producción y demanda entre viviendas. En línea con esto, cabe esperar otros ahorros económicos derivados del empleo de sistemas de producción centralizados con menores costes de mantenimiento que, por simplicidad, no se han considerado en este cálculo.
- Asociado con el punto anterior, al emplear bombas de calor de mayor escala y gestión optimizada, se amplía el potencial para conseguir mejores valores de COP del sistema.
- Asimismo, se pueden plantear modificaciones al sistema propuesto tanto en la configuración (*by-pass* a la bomba, varias fuentes en paralelo…), como en la operación

del conjunto que permitan una mejor gestión y aprovechamiento de la energía captada (basada en la disponibilidad y capacidad de los elementos disponibles). Esto permitiría también elevar el rendimiento del conjunto, lo que reduciría la electricidad consumida, mejorando el resultado del estudio planteado.

En cualquier caso y, como ocurre al plantear escenarios de rehabilitación como el propuesto, el resultado depende de la situación de partida puesto que el éxito de la operación lo establecen los ahorros obtenidos. En este caso, cabe destacar que los escenarios de referencia planteados resultan bastante realistas y representativos de situaciones que se pueden encontrar en el entorno construido cercano y que, por tanto, los resultados obtenidos aportan una valiosa referencia acerca del potencial de la solución propuesta para ser empleada en obras de rehabilitación. Asimismo, la intervención de rehabilitación planteada implica una serie de trabajos para reformar y actualizar los edificios, similares a los que se están promoviendo en la actualidad para la reforma energética de los edificios y sus fachadas.

Hay que remarcar que, se han alcanzado unos ahorros de energía primaria muy importantes, de entre 65 – 66 % en los consumos de ACS y calefacción, pero, en este punto, resulta muy significativo también que, tal y como se ha destacado al plantear el escenario de referencia, las necesidades de ACS y calefacción representan dos tercios del consumo total promedio de las viviendas y el tercio restante, está vinculado a otros consumos eléctricos de iluminación y electrodomésticos que no se han contemplado en este estudio. Esto supone que, si se pretende alcanzar el objetivo de viviendas de consumo bajo o nulo (NZEB), se deben plantear acciones para mejorar esos sistemas también. A fin de cuentas, el edificio es un sistema completo e interconectado y para plantear intervenciones integrales, los enfoques de rehabilitación también deberán ser integrales y sistémicos.

Otro aspecto muy relevante a destacar es la propuesta realizada en la que se plantea sustituir la fuente energética principal cambiando gas por electricidad. Este cambio implica una reducción de la energía consumida (expresada en kWh) al pasar a un sistema eléctrico, pero, cuando se analiza el coste de la energía o sus implicaciones en cuanto a energía primaria, ese ahorro energético no siempre es tan significativo o puede incluso llegar a ser contraproducente en el balance final. Podría llegar incluso a considerarse que este cambio a un sistema eléctrico es perjudicial.

Es importante resaltar en este punto que, la propuesta de sustituir la fuente primaria de energía está alineada con estrategias similares en las que se apuesta por una electrificación de los diferentes sectores (como es el caso del coche eléctrico), pero siempre desde una estrategia de gestión eficiente y sostenida en la generación basada en renovables y, en el caso de la edificación, potenciando también al máximo la generación in situ. Por tanto, el problema no está tanto en que se cambie a un sistema eléctrico, sino que, junto con esta modificación se optimice y se mejore al máximo los procesos de generación, distribución y consumo, buscando minimizar al mínimo los impactos finales asociados a dicho consumo.

Las soluciones habitualmente empleadas para reducir el consumo energético de los edificios, como mejorar el aislamiento de la envolvente, incorporación de renovables o actualización de componentes por equipos más eficientes, son medidas con una eficacia contrastada. Pero cuando se persigue el objetivo NZEB, en general y, dadas las elevadas exigencias de este concepto, no resulta suficiente con aplicar una única medida de acción de mejora. Se deben

plantear un enfoque combinado y sistémico combinando los elementos de la envolvente con los sistemas de producción y gestión tanto renovables como convencionales.

El mismo objetivo de NZEB permite múltiples combinaciones de sistemas y componentes por lo que la flexibilidad y complementariedad entre elementos es un requisito indispensable. En este caso, se ha planteado emplear una bomba de calor acoplada a una fachada solar que implica, un consumo de electricidad con un COP cercano a 4, en el mejor de los casos, lo que supone que siempre se va a dar consumo mínimo para ACS, el mínimo de energía eléctrica consumida viene determinado por ese factor.

La conclusión que resulta de este escenario es que se deben investigar y plantear diseños alternativos y optimizados para el conjunto que busquen, evitar emplear la bomba de calor cuando la producción solar genere niveles de temperatura suficientes, lo que aumentará el COP del sistema al evitar un consumo eléctrico excesivo de la bomba. Asimismo, se han identificado otras aproximaciones alternativas y complementarias de operación y gestión de la energía y de los componentes, que también tienen un gran potencial para elevar el COP del conjunto, posibilitando la reducción del consumo eléctrico.

Cuando se planteen soluciones para nuevos edificios, las combinaciones de tecnologías podrán ser adaptadas y ajustadas al diseño requerido por el proyecto. En el caso de la rehabilitación, el punto de partida es determinante. Para el escenario propuesto, la solución implica ahorros muy importantes. Sin embargo, en general, se dan una serie de barreras en ese escenario a rehabilitar que no permiten alcanzar NZEB en todos los casos, aunque sí que se consiguen ahorros muy importantes de hasta dos tercios del consumo de ACS y calefacción para esta primera concepción y propuesta del sistema combinado de fachada y bomba de calor.

Por todo lo anterior, resulta razonable y de gran interés plantear esta progresión hacia un consumo de los edificios con una mayor presencia de la electricidad y que, para cubrir esas necesidades de electricidad requeridas, se deben plantear soluciones y tecnologías integradas y combinadas en las que, además del sistema de fachada solar térmica, se planteen sistemas complementarios que permitan la generación local de la electricidad requerida, potenciando medidas de autoconsumo con paneles fotovoltaicos o, soluciones híbridas (PVT). En este punto los paneles PVT tienen un gran potencial de desarrollo puesto que combinan las dos generaciones, eléctrica y térmica, en un mismo concepto, propuesta que se adapta perfectamente a la propuesta planteada.

Cuando se toma consciencia de que no existe una única solución o sistema ideal que se adapte a todos las situaciones y escenarios, se trata de valorar y cuantificar si, una solución alternativa como la planteada, en un sistema integrado, proporciona claras ventajas frente a las soluciones que se están proponiendo actualmente para la rehabilitación.

La conclusión principal que se ha obtenido de todo el análisis planteado ha sido la demostración de que la solución propuesta es una alternativa competitiva y viable a las intervenciones actualmente consideradas en rehabilitación para la gran mayoría de los escenarios analizados, especialmente para edificios colectivos en altura.

# 7. CONCLUSIONES PRINCIPALES DE LA TESIS

Las fachadas solares térmicas representan, actualmente, una tendencia y línea de desarrollo en continua evolución que cada vez están suscitando un mayor interés en el sector. Aunque se han identificado algunas soluciones y desarrollos en este ámbito, todavía no se cuenta con suficiente información ni tampoco con diferentes alternativas que, dentro del ámbito de las fachadas solares, puedan ser consideradas como soluciones viables y contrastadas para ser incorporadas a los nuevos y modernos edificios eficientes energéticamente, o siguiendo una filosofía similar, para incorporarlas a los edificios existentes y rehabilitarlos convenientemente.

Conocer y entender mejor las posibilidades y viabilidad de estos sistemas es una medida de estímulo para elevar el nivel de aplicación de estas tecnologías, a la vez que fomenta el desarrollo de otras soluciones similares o concebidas sobre estos mismos conceptos.

El objetivo principal sobre el que se ha fundamentado el desarrollo de la tesis es el de comprender y analizar las posibilidades de las fachadas solares como una alternativa viable en el ámbito de la edificación y de la eficiencia energética y, de forma explícita, proponer, cuantificar y evaluar una solución concreta que, concebida para ser una solución basada en la tecnología de paneles de fachada de acero ya madura, demuestre el potencial que tienen las fachadas solares para ser consideradas como una propuesta con un elevado grado de fiabilidad.

Para ello se ha desarrollado una aproximación por fases con el objetivo último de ir conociendo, de forma progresiva, la forma en la que se comporta la solución propuesta en los diferentes niveles del estudio planteados:

- En primer lugar, se ha constatado que existen actualmente propuestas para plantear fachadas solares. Se trata de conceptos y diseños que definen estos sistemas, con diferentes grados de complejidad, combinando materiales y tecnologías variadas. Se ha confirmado el creciente interés en soluciones basadas en la energía solar, pero también se ha identificado que, las soluciones con fachadas solares, aunque existen, son todavía muy testimoniales y experimentales, por lo que no cuentan aun con un grado de madurez suficiente y apenas se encuentran soluciones comerciales disponibles en el mercado.
- A continuación, y, tomando en consideración las diferentes alternativas analizadas en el punto anterior, se ha buscado proponer una solución de fachada solar que, basada en la tecnología de los paneles sándwich, proponga una alternativa competitiva y con un alto grado de integración, pero, también, con suficiente potencial para alcanzar resultados relevantes en términos de captación solar, aprovechando las propiedades del acero en este ámbito. [Fase de investigación orientada a los MATERIALES]
- La siguiente fase ha consistido en valorar alternativas a este concepto propuesto, contemplando el efecto de los diferentes parámetros de diseño y de operación del sistema en la respuesta de este en términos de rendimiento y de producción de la fachada solar. Para ello se ha desarrollado un estudio paramétrico empleando un modelo CFD que ha sido validado con resultados experimentales. Como conclusión se han identificado los parámetros que tienen mayor impacto en cuanto a rendimiento y producción solar, diferenciando aquellos que se definen con el diseño del conjunto de aquellos parámetros dinámicos que, o bien vienen fijados por las condiciones ambientales, o bien pueden ser configurados al operar el sistema. [Fase de investigación orientada a las soluciones constructivas o PRODUCTO]

- Siguiendo con el proceso y ampliando el enfoque más allá del panel de fachada solar, el siguiente paso ha consistido en analizar el funcionamiento de un prototipo de fachada solar en condiciones reales de funcionamiento. Se ha llevado a cabo una extensa campaña experimental de más de 18 meses, contemplando tanto el funcionamiento de la fachada solar a modo de elemento principal, como la interacción que tiene con un sistema completo de producción de calor operado por una bomba de calor. Esto ha permitido caracterizar la respuesta de los elementos principales del sistema y, se han demostrado las ventajas al combinar ambos componentes; fachada solar y bomba de calor, tanto para mejorar el rendimiento de la fachada como para obtener valores de COP competitivos. Asimismo, se han contextualizado los resultados obtenidos en el ámbito de las soluciones para fachadas solares similares, contrastando los datos monitorizados. [Fase de investigación orientada a los sistemas de calefacción y ACS o SISTEMA]
- Para concluir, se ha estudiado el impacto que el sistema desarrollado tiene en una aplicación de edificación. Se han contemplado escenarios alternativos para valorar la contribución de la fachada solar y la reducción en el consumo del edificio cuando se considera una rehabilitación empleando la solución tecnológica propuesta. La principal conclusión es que la solución planteada representa una alternativa viable y competitiva a las tecnologías comparables y actualmente empleadas, tanto en la construcción de nuevos edificios, como en la rehabilitación de los existentes. [Fase de investigación orientada a la eficiencia energética en edificación residencial – EDIFICIO]

Resulta necesario destacar que, puesto que una única tecnología o solución no puede ser considerada como estándar ni más adecuada para resolver todas las situaciones de rehabilitación, se debe tomar consciencia de que los enfoques tienen que ser sistémicos e integrales, combinando, según el caso, diferentes y variadas tecnologías para resolver cada obra de rehabilitación. En este escenario, la propuesta principal que se plantea a través de esta tesis es la tecnología de fachadas solares como una alternativa competitiva y viable que, por sí solas o, especialmente cuando se aprovechan las sinergias y se combinan con otras tecnologías compatibles, como las bombas de calor, puede contribuir de forma muy significativa a la mejora de la eficiencia energética de los edificios.

Al analizar el impacto final en la aplicación de unos escenarios típicos de edificación residencial, se ha constatado que el sistema es altamente competitivo, alcanzando unos ahorros de energía primaria muy importantes, de entre el 62 – 67 % para los consumos de ACS y calefacción analizados. Concretamente se consigue cubrir el 100% de las necesidades de ACS y se obtiene un excedente energético que se destina para complementar la producción de agua caliente destinada a calefacción.

Al plantear un escenario de rehabilitación, en una intervención que implica la instalación de fachadas solares, se obtienen unos ahorros que permiten amortizar la inversión necesaria para la obra de rehabilitación en un plazo en el entorno de los 13 años. El empleo de fachadas solares incorporando en el mismo componente la función de aislamiento térmico y de colectores solares, resulta ser, para vivienda residencial colectiva (MFH), más ventajosa con un retorno de la inversión 8 años menor, que, si se instalan de forma separada, el sistema aislante en la fachada

y los colectores solares en cubierta. En el caso de las viviendas unifamiliares (SFH) el retorno de la inversión resulta ser bastante similar para ambas intervenciones.

Pero el desarrollo por fases planteado ofrece una oportunidad para profundizar en muchos aspectos técnicos y valorar diferentes matices que resultan de gran interés al plantear estas soluciones. Estos análisis permiten identificar la viabilidad de estas tecnologías, valorar alternativas y destacar el potencial de los conceptos de fachadas solares y sistemas activos como los propuestos. Esta aproximación en diferentes escalas implica que, para valorar los diferentes conceptos (material, producto, sistema y edificio), también se deban plantear herramientas y métricas de análisis acordes a la escala y contexto considerado. De forma específica:

- [Fase – MATERIALES]: El análisis de los materiales ha permitido comprender e interiorizar la importancia que tiene una adecuada selección de materiales para los elementos principales de la fachada activa: panel y circuito hidráulico. Las propiedades principales de los materiales como la conductividad (expresada en W/mK) y la absortividad (%), junto con la necesaria compatibilidad entre cada capa para conformar el panel activo completo ha sido la conclusión principal a este respecto.
- [Fase – PRODUCTO]: En este caso se ha podido contextualizar y destacar las implicaciones que se dan al combinar los materiales seleccionados en un sistema integrado, definido por las dimensiones y posición de los componentes en el panel activo. Se trata por tanto de considerar los diferentes parámetros de diseño y el impacto que estos factores tienen en el comportamiento del conjunto (expresado en rendimiento (%) y producción solar (kWh/$m^2$ de panel). Asimismo, se han valorado también, para un diseño dado, los efectos de los parámetros dinámicos de configuración y ambientales (vinculados a las condiciones exteriores).
- [Fase – SISTEMA]: Al elevar la escala de análisis al sistema en el que se acopla la fachada solar a una bomba de calor, se han considerado, en primer lugar, estos dos elementos de forma independiente, para analizar a continuación el funcionamiento del conjunto cuando los dos trabajan acoplados. Este enfoque ha permitido evaluar y cuantificar la mejora que se alcanza con el sistema acoplado tanto para la respuesta del panel (kWh de energía térmica anual y rendimiento), como en la bomba de calor (COP y kWh de electricidad consumida).
- [Fase – EDIFICIO]: En la etapa final, la aplicación del sistema propuesto a diferentes escenarios de edificación ha permitido evaluar el impacto que un conjunto de fachada solar y bomba de calor tiene en el consumo de los edificios. De forma específica se ha podido cuantificar la fracción solar (% del consumo cubierto con renovables) que se alcanza para las diferentes aplicaciones: ACS y calefacción. Además, se han podido estimar los ahorros que se alcanzan en términos de reducción de energía primaria (%) y total consumida (kWh/$m^2$ año).

## 7.1. Contribuciones realizadas

Las principales contribuciones obtenidas, fruto de la investigación desarrollada en el transcurso de la tesis, en la que se ha propuesto un nuevo concepto de fachada solar y se ha buscado comprender y analizar mejor las implicaciones de dicha propuesta, pueden agruparse en tres grandes bloques:

1. DESARROLLO DE PRODUCTO:

- Fachada solar térmicamente activa:
    - Definición y desarrollo de un concepto de sistema industrializado de fachada solar térmica, partiendo de un concepto de sistema sándwich en acero, para obtener una solución de fachada activa que integra un colector solar no vidriado. Diseño y conceptualización incorporando un circuito solar al panel sándwich. Desarrollo basado en los conceptos de integración y adaptación natural al edificio, contemplando diferentes estrategias y alternativas para incorporar los sistemas activos a las envolventes.
    - Análisis de Propuestas y alternativas al diseño. Identificación y evaluación de parámetros clave para el diseño. Estudio paramétrico contemplando 17 factores (12 de diseño y 5 dinámicos) empleando un modelo CFD, desarrollado para tal fin, con el que se ha podido constatar la mayor o menor relevancia de los diferentes factores analizados, así como su influencia en la energía que se puede conseguir a través del sistema de fachada activa. Las investigaciones llevadas a cabo durante el proceso de desarrollo del modelo y la aplicación del mismo para desarrollar el estudio paramétrico han sido publicadas en diferentes artículos [339], [340] y [342].
    - En lo referente a los parámetros de diseño, la longitud del panel de fachada, su capacidad de absorción y los materiales empleados se identifican como parámetros clave de diseño, mientras que el número de tuberías por panel y el nivel de aislamiento tienen, en general, una relevancia menor. En términos globales el empleo de metales con alta conductividad ($\lambda > 50$ W/mK) y capacidad de absorción ($\alpha > 0,9$) en el absorbedor resulta de interés para esta aplicación. La menor relevancia del aislamiento queda condicionada a que exista una cantidad mínima del mismo (10 mm de espesor y < 0,04 W / mK) para evitar una fuga importante de calor por la cara posterior del panel.
    - Por otro lado, para el caso de los parámetros dinámicos, se ha identificado el diferente comportamiento en cada caso. Así, una combinación efectiva de una regulación adecuada del caudal maximizándolo cuando se dan los momentos de mayor radiación, permitirá maximizar la producción solar, aunque este incremento de producción apenas influirá en el rendimiento. Por el contrario, para las otras variables que maximizan el rendimiento (temperatura de

impulsión y temperatura ambiente) sí que se obtiene una correlación más directa con el salto térmico y la producción solar de la fachada activa.

- La cuantificación del impacto de los diferentes factores ha permitido identificar pautas y planteamientos de diseño y operación del sistema que mejoran la respuesta del sistema activo. De esta forma, se pueden plantear en el futuro diseños alternativos y soluciones que permitan incrementar el rendimiento y la producción de la fachada solar.

- Sistema de producción combinando fachada solar con bomba de calor:
  - Propuesta de sistema combinado con un equipo de bomba de calor en el que la fachada solar actúa como elemento captador. Esta solución permite, de manera sinérgica, mejorar el rendimiento de ambos componentes: fachada y bomba de calor. Se ha demostrado y cuantificado esta mejora para cada componente comparando el funcionamiento en modo acoplado frente al modo desacoplado. La metodología desarrollada para plantear el análisis comparativo y la aplicación de la misma para cuantificar la mejora relativa se ha publicado en los siguientes artículos científicos: [340] y [341].
  - Para el sistema desacoplado los rendimientos y producción que se consiguen en la fachada son modestos (valores máximos <25% y 10,2% de media) aunque la cantidad de energía que se consigue por unidad de superficie (de media diaria 306 $Wh/m^2$) permitiría considerar esta solución si se cuenta con suficiente superficie de fachada activa.
  - Para el sistema acoplado la ventaja que se alcanza en la fachada es muy significativa con rendimientos y producciones que pueden llegar a ser hasta 7 veces superiores: 71,45% y 2,25 $kWh/m^2$ respectivamente. Estos valores que resultan de comparar las campañas experimentales deben considerarse en el contexto de las mismas asociadas a las condiciones ambientales y de producción para las cargas asociadas.
  - En cuanto al rendimiento obtenido, el valor del COP del sistema solar (SAHP) se puede considerar que, en prácticamente en todos los casos el rendimiento es superior al del caso de una bomba por aerotermia, pero sin llegar a alcanzar rendimientos como los de la geotermia. Sin embargo, sí que se han identificado algunas alternativas y formas de operación del sistema con potencial para incrementar el COP del conjunto.

2. PROTOTIPADO Y VALIDACIÓN EXPERIMENTAL:

- Desarrollo de una campaña experimental específica durante 18 meses en KUBIK® que ha permitido obtener datos e información muy relevante acerca del funcionamiento detallado de la fachada solar en condiciones reales de uso, contemplando regímenes de funcionamiento alternativos y durante diferentes épocas del año. En ese período se han registrado 85 variables que describen el comportamiento del sistema, consiguiendo

información completa y detallada para un total de 264 días. Estos resultados han permitido valorar, analizar y caracterizar mejor el modo en el que se comporta tanto la fachada activa como el sistema combinado en condiciones muy variadas y diversas, incluyendo situaciones extremas en invierno y verano. [340], [341].

- Generación y procesado de datos experimentales de los diferentes componentes del sistema (fachada solar y bomba de calor), tanto acoplados como desacoplados, en condiciones de servicio reales. Demostración de las capacidades del sistema cuantificando el rendimiento del conjunto y de sus componentes principales, destacando la contribución del sistema solar en forma de energía renovable y la reducción de consumos conseguida. [340].

3. METODOLOGIA DE DIMENSIONAMIENTO:

- Desarrollo de modelo de predicción de la fachada solar, mediante modelización fluidodinámica CFD, validando el modelo con datos experimentales. [339]
- Caracterización del comportamiento del conjunto de colector solar y de la bomba de calor basada en campaña experimental desarrollada para tal fin. Cuantificación de los factores principales en cuanto a rendimientos y energía solar aprovechada. Esta caracterización ha permitido estimar el comportamiento de los sistemas en escenarios alternativos al experimental. De forma explícita:
    - Se han obtenido las curvas de funcionamiento de la fachada desacoplada. Para un panel de 6m$^2$ y, calculadas para diferentes velocidades de viento, el resultado es un rango de rendimiento máximo ($F_R$ $\alpha$) de 0,34 – 0,47 y un factor de reducción energética ($F_R$ $U_L$) de 4,851 – 7,501. [339].
    - Para el caso acoplado a la bomba de calor, se ha podido constatar que el incremento de la demanda favorece un mayor rendimiento y producción solar, pudiendo explicitar esta relación mediante una ecuación obtenida experimentalmente. Se ha concluido que, para el sistema de fachada solar acoplado a la bomba de calor, se da una relación entre el rendimiento de la fachada y la radiación incidente diaria acumulada, en función de la cantidad de energía diaria en forma de calor que produce por el conjunto.
- Análisis de la repercusión del empleo de la solución desarrollada en la estimación de consumos energéticos de edificios y contribución del sistema de fachada solar, gracias a la citada caracterización de las soluciones desarrolladas.
    - Cuando se aplica el sistema combinado a un edificio residencial representativo y se considera una rehabilitación interviniendo en la fachada e incorporando el sistema solar activo, el resultado es un ahorro tanto energético (energía primaria anual) como económico (€/año) en un rango de 62 – 67% para ambas magnitudes.
    - Estos ahorros permiten amortizar la inversión necesaria para instalar la fachada solar en un plazo cercano a los 13 años.

## 7.2. Futuras líneas de investigación

El trabajo fruto de las investigaciones llevadas a cabo en el desarrollo de la tesis, ha permitido identificar, más allá de los resultados comentados, otra serie de líneas de investigación que se consideran tienen un interés y potencial importante para poder ser estudiadas en mayor profundidad.

En todos los casos, se conciben la definición de paneles definidos bajo el prisma de sistemas altamente industrializados, que permitan aprovechar las tecnologías de fabricación avanzadas y que ofrezcan sistemas de máxima fiabilidad.

Para el desarrollo de sistemas de fachadas solares térmicas como las desarrollada, se plantean **diseños alternativos** para los que, empleando una combinación de materiales y diseños diferentes, se puedan alcanzar mayores rendimientos y producciones que los alcanzados con el prototipo desarrollado, buscando optimizar los fenómenos de captación y transmisión de energía térmica entre las diferentes capas del panel. En esta línea, se plantea también el desarrollo de una evolución del sistema no vidriado propuesto, hacia una **solución vidriada** que incorpore una capa acristalada exterior y que, a la vez que obtenga producciones y rendimientos mejorados, permita mayor diversidad de acabados para el sistema. En este caso y, si los niveles de temperatura alcanzados son suficientes, se podrían incluso llegar a considerar **aplicaciones de frío solar**, con lo que se abriría un nuevo y amplio campo para la investigación.

Otra propuesta con gran potencial para ser estudiada **es el diseño de soluciones de fachadas solares activables** con las que se puedan habilitar o deshabilitar la acción activa del panel según convenga. Esto permitiría maximizar la superficie de captación en los meses de mayor demanda y limitar la parte activa en verano para evitar la sobreproducción.

La combinación de las fachadas solares con múltiples y diferentes sistemas de producción de calor abre un campo muy amplio a la investigación de conceptos alternativos al planteado en el que se han puesto de manifiesto las bondades al conectar, de forma indirecta, la fachada activa y una bomba de calor que funciona con agua en ambos focos. Además, el **estudio de alternativas en la forma de las conexiones directa /indirecta**, resulta de gran interés para analizar sistemas más versátiles, contemplando más de una fuente dispuestas en paralelo con el sistema solar, como la aerotermia o la geotermia. Para poder operar convenientemente estos sistemas multi – fuente, se requieren **desarrollos complementarios en el ámbito del control y gestión de los componentes**, para por así obtener los mejores rendimientos del conjunto, buscando el mayor y óptimo aprovechamiento de cada tecnología.

La **interacción de las soluciones propuestas con otras tecnologías de producción**, además de las bombas de calor, como calderas o redes de distrito, también son muy relevantes. Incluso, la relación y correcta gestión del doble aprovechamiento solar, térmico y eléctrico, desarrollando sistemas que, combinando adecuadamente ambas formas de energía, gestionen eficientemente los procesos de captación, almacenamiento y consumo, para obtener una mayor contribución de energía renovable. El sistema se sustenta sobre el cambio hacia edificios y sistemas con un mayor nivel de electrificación, por lo que, en este punto, los **paneles fotovoltaicos (PV) o híbridos (PVT) que alimenten total o parcialmente la bomba de calor**, representan una línea de desarrollo de mucho potencial, en la que, de nuevo, la fachada puede tener un gran protagonismo.

Para finalizar, cabe destacar la **necesidad de más demostraciones** de las capacidades de estas tecnologías **en edificios reales** y bajo diferentes escenarios de aplicación. Se trata de analizar, monitorizar y experimentar con los sistemas de fachadas solares en **diferentes orientaciones**, en **usos y tipologías de edificios alternativos**, en **localizaciones con climas variados** y **acoplados a diferentes tecnologías de producción de calor** como los destacados en los apartados previos.

# 8. REFERENCIAS


[291] Agostino, D. D., & Parker, D. (2020). A framework for the cost-optimal design of nearly zero energy buildings (NZEBs) in representative climates across Europe. Energy, 149(2018), 814–829. https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.02.020

[292] Attia, S., Eleftheriou, P., Xeni, F., Morlot, R., Ménézo, C., Kostopoulos, V., … Hidalgo-betanzos, J. M. (2019). Overview and future challenges of nearly zero energy buildings (nZEB) design in Southern Europe. Energy & Buildings, 155(2017), 439–458. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.09.043

[293] Cabeza, L. F., & Chàfer, M. (2020). Technological options and strategies towards zero energy buildings contributing to climate change mitigation: A systematic review. Energy & Buildings, 219. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110009

[294] Schlueter, A., & Thesseling, F. (2009). Building information model based energy / exergy performance assessment in early design stages. Automation in Construction, 18(2), 153–163. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2008.07.003

[295] Sankey Diagrams. http://www.sankey-diagrams.com/tag/house/

[296] IDAE. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. (2011). Proyecto SECH-SPAHOUSEC. Análisis del consumo energético del sector residencial en España. https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_Informe_SPAHOUSEC_ACC_f68291a3.pdf

[297] Ministerio de Fomento. (2019). Código Técnico de la Edificación (CTE). Documento Básico HE Ahorro de energía. Publicado el 20 diciembre 2019. https://www.codigotecnico.org/

[298] Stamp, S., Altamirano-medina, H., & Lowe, R. (2017). Measuring and accounting for solar gains in steady state whole building heat loss measurements. Energy & Buildings, 153, 168–178. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.06.063

[299] Burmeister, H., & Keller, B. (1998). Climate surfaces: a quantitative building-specific representation of climates. Energy & Buildings, 28, 167–177

[300] Gagliano, A., Patania, F., Nocera, F., & Signorello, C. (2014). Assessment of the dynamic thermal performance of massive buildings. Energy & Buildings, 72, 361–370. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.12.060

[301] Stazi, F. (2017) Thermal Inertia in Energy Efficient Building Envelopes. 1st Edition. Elsevier. ISBN: 978-012813971-4;978-012813970-7. DOI: 10.1016/C2016-0-00641-1

[302] Reilly, A., & Kinnane, O. (2017). The impact of thermal mass on building energy consumption. Applied Energy, 198, 108–121. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.04.024

[303] Verbeke, S., & Audenaert, A. (2020). Thermal inertia in buildings: A review of impacts across climate and building use. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 82(November 2016), 2300–2318. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.083

[304] Catalina, T., Iordache, V., & Caracaleanu, B. (2013). Multiple regression model for fast prediction of the heating energy demand. Energy & Buildings, 57, 302–312. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.11.010

[305] Rosa, M. De, Bianco, V., Scarpa, F., & Tagliafico, L. A. (2014). Heating and cooling building energy demand evaluation; a simplified model and a modified degree days

approach. Applied Energy, 128, 217–229. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.04.067

[306] IDAE. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. (2019). Soluciones de Acristalamiento y Cerramiento Acristalado. Guías Técnicas para la rehabilitación de le envolvente térmica de los edificios. https://www.idae.es

[307] Granzotto, M., Chèze, D., & Haller, M. Y. (2014). Impact of small weather data time steps on the simulation of solar and heat pump systems. EuroSun 2014, Conference Proceedings, Aix-les-Bains (France), 16-19 September 2014. https://doi.org/10.18086/eurosun.2014.03.10

[308] Buker, M. S., & Riffat, S. B. (2016). Solar assisted heat pump systems for low temperature water heating applications: A systematic review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 55, 399–413. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.157

[309] Kamel, R. S., Fung, A. S., & Dash, P. R. H. (2015). Solar systems and their integration with heat pumps: A review. Energy & Buildings, 87, 395–412. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.11.030

[310] Mohanraj, M., Belyayev, Y., Jayaraj, S., & Kaltayev, A. (2018). Research and developments on solar assisted compression heat pump systems – A comprehensive review (Part-B: Applications). Renewable and Sustainable Energy Reviews, 83, 124–155. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.086

[311] Carbonell, D., Haller, M. Y., Philippen, D., & Frank, E. (2014). Simulations of combined solar thermal and heat pump systems for domestic hot water and space heating. Energy Procedia, 48, 524–534. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.02.062

[312] Lerch, W., Heinz, A., & Heimrath, R. (2015). Direct use of solar energy as heat source for a heat pump in comparison to a conventional parallel solar air heat pump system. Energy & Buildings, 100, 34–42. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.03.006

[313] Hadorn (Ed.), J.-C. (2015). Solar and Heat Pump Systems for Residential Buildings. Wiley - ISBN: 978-3-433-03040-0.

[314] Asaee, S. R., Ugursal, V. I., & Beausoleil-morrison, I. (2017). Techno-economic assessment of solar assisted heat pump system retrofit in the Canadian housing stock. Applied Energy, 190, 439–452. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.053

[315] Nouvel, R., Cotrado, M., & Pietruschka, D. (2015). European mapping of seasonal performances of air-source and geothermal heat pumps for residential applications. CISBAT 2015 Conference Proceedings, 543–548, Lausanne, Switzerland, September 9-11

[316] Poppi, S., Bales, C., Haller, M. Y., & Heinz, A. (2016). Influence of boundary conditions and component size on electricity demand in solar thermal and heat pump combisystems. Applied Energy, 162, 1062–1073. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.190

[317] Ente Vasco de la Energía. EVE. https://www.eve.eus

[318] Instituto para la Diversificación y ahorro de la Energía. IDAE. https://www.idae.es/

[319] Ente Vasco de la Energía. EVE. (2013). Claves energéticas del sector Doméstico en Euskadi. https://www.eve.eus/CMSPages/GetFile.aspx?guid=b4e1b1eb-b0fa-4463-a2d2-b7d18109cb91

[320] European Commission. EU Building Stock Observatory. (BSO). https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/eu-bso_en

[321] Elguezabal, P., Arregi, B., Schuetz, P., Gwerder, D., Scoccia, R., Tsatsakis, K., Biosca, J., Bortkiewicz, A., Waser, R., Sturzenegger, D. (2018). Review of the European dwelling stock and its potential for retrofit interventions using solar-assisted heating and cooling. REHABEND 2018. Construction Pathology, Rehabilitation Technology and Heritage Management. May 15-18, 2018. Cáceres, Spain. ISBN: 978-84-697-7033-7. pp 1780-1791

[322] Bertram, E., Glembin, J., Scheuren, J., Rockendorf, G., & Zienterra, G. (2008). Unglazed Solar Collectors in Heat Pump Systems: Measurement, Simulation and Dimensioning. In EuroSun 2008, Conference Proceedings

[323] Reda, F., Arcuri, N., Loiacono, P., & Mazzeo, D. (2015). Energy assessment of solar technologies coupled with a ground source heat pump system for residential energy supply in Southern European climates. Energy, 91, 294–305. https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.08.040

[324] Reda, F., & Laitinen, A. (2015). Different strategies for long term performance of SAGSHP to match residential energy requirements in a cold climate. Energy & Buildings, 86, 557–572. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.10.056

[325] Dott, R., Haller, M. Y., Ruschenburg, J., Ochs, F. & Bony, J. (2013) The Reference Framework for System Simulations of the IEA SHC Task 44 / HPP Annex 38. Part B: Buildings and Space Heat Load. Report C1 Part B. IEA Solar Heating and Cooling Programme

[326] Granadeiro, V., Correia, J. R., Leal, V. M. S., & Duarte, J. P. (2013). Envelope-related energy demand: A design indicator of energy performance for residential buildings in early design stages. Energy & Buildings, 61, 215–223. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.02.018

[327] Valencian Institute of Building. (IVE). (2011). Use of Building Typologies for Energy Performance Assessment of National Building Stock. Existent Experiences in Spain November 2011. https://episcope.eu/fileadmin/tabula/public/docs/scientific/ES_TABULA_Report_IVE.pdf

[328] UNE. Normalización Española. (2012). Norma UNE-EN ISO 6946:2012. Componentes y elementos para la edificación. Resistencia térmica y transmitancia térmica. Método de cálculo. (ISO 6946:2007)

[329] Energy Plus. Weather Data. https://energyplus.net/weather

[330] Bac, A., Nems, M., Nems, A., & Kasperski, J. (2019). Sustainable Integration of a Solar Heating System into a Single-Family House in the Climate of Central Europe — A Case Study. Sustainabilty, 11, 4167. https://doi.org/doi:10.3390/su11154167

[331] European Commission. Commission Recommendation (EU) 2016/1318, (2016), of 29 July 2016 on guidelines for the promotion of nearly zero-energy buildings and best practices to ensure that, by 2020, all new buildings are nearly zero-energy buildings.

[332] Ministerio de Fomento. (2016). Documento Reconocido del Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE). factores de emisión de CO2 y coeficientes de paso a energía primaria de diferentes fuentes de energía final consumidas en el sector de edificios en España. https://energia.gob.es/desarrollo/EficienciaEnergetica/RITE/Reconocidos/Reconocidos/Otros%20documentos/Factores_emision_CO2.pdf

[333] Bellos, E., & Tzivanidis, C. (2017). Energetic and financial sustainability of solar assisted heat pump heating systems in Europe. Sustainable Cities and Society, 33(April), 70–84. https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.05.020

[334] Solarthermalworld. (2020). Solar houses: above 95 % solar fraction is possible https://www.solarthermalworld.org/news/solar-houses-above-95-solar-fraction-possible

[335] Boudjabeur, S., Harper, C., Elguezabal, P., Garay, R., Chica, J.A., Aranburu, L., … Toledo, C. (2018). Building active steel skin. (BASSE). Grant agreement nº: RFSR-CT-2013 - 00026. Final report, ISBN 978-92-79-94133-7. ISSN 1831-9424. https://publications.europa.eu/en/web/general-publications/publications

[336] Zhang, X., Shen, J., Lu, Y., He, W., Xu, P., Zhao, X., Dong, X. (2015). Active Solar Thermal Facades (ASTFs): From concept, application to research questions. Renewable and Sustainable Energy Reviews. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.108

[337] Rad, F. M., Fung, A. S., & Leong, W. H. (2013). Feasibility of combined solar thermal and ground source heat pump systems in cold climate, Canada. Energy & Buildings, 61, 224–232. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.02.036

[338] Sigrist, D., Deb, C., Frei, M., & Schlüter, A. (2019). Cost-optimal retrofit analysis for residential buildings. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1343/1/012030

[339] Elguezabal, P., Lopez, A., Blanco, J. M., & Chica, J. A. (2020). CFD model-based analysis and experimental assessment of key design parameters for an integrated unglazed metallic thermal collector façade. Renewable Energy, 146, 1766–1780. https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.07.151

[340] Elguezabal, P., Lopez, A., Blanco, J. M., & Chica, J. A. (2020). Assessment on the Efficiency of an Active Solar Thermal Facade: Study of the Effect of Dynamic Parameters and Experimental Analysis When Coupled / Uncoupled to a Heat Pump. Energies, 13 (3) (597). https://doi.org/https://doi.org/10.3390/en13030597

[341] Elguezabal, P., Lopez, A., Blanco, J. M., & Chica, J. A. (2019). New concept of solar collector integrated into a sandwich panel as an active façade; CFD based parametric assessment and case study. DYNA, 94, 691–698. https://doi.org/ http://dx.doi.org/10.6036/9274

[342] Elguezabal, P., Lopez, A., Blanco, J.M., Chica, J.A. (2019). Parametric assessment of a building active façade by means of a combined metallic sandwich panel with an unglazed solar collector. MATEC Web Conf. 282 02046 (2019). DOI: https://doi.org/10.1051/matecconf/201928202046