

RESUMEN EJECUTIVO

La necesidad de reducir el consumo de energía en los edificios precisa: primero, que la demanda energética del edificio sea lo menor posible; segundo, que los sistemas integrados en el edificio presenten una alta eficiencia energética y, finalmente, que la energía consumida tenga el mínimo impacto ambiental posible (EERR). Dentro de esta metodología, los sistemas que utilizan el enfriamiento evaporativo se manifiestan como sistemas con una alta eficiencia energética, debido a su bajo consumo de energía, entre otros beneficios.

Los sistemas de enfriamiento evaporativo permiten acondicionar en verano los espacios con un consumo de energía mucho menor que los sistemas convencionales de compresión mecánica, disponiendo de diferentes tecnologías que pueden ser utilizadas en muchas aplicaciones, incluidas aquellas que presentan características singulares.

El grupo de investigación de Termotecnia de la Universidad de Valladolid ha mantenido una línea de investigación sobre sistemas evaporativos activa los últimos treinta años, que ha derivado en el desarrollo de diferentes tesis doctorales, Trabajos Fin de Grado y Máster, proyectos de investigación competitivos y con empresas, publicaciones, etc., en este tiempo, ha adquirido una gran experiencia en la caracterización de las distintas tipologías de sistemas evaporativos y en el desarrollo de nuevos prototipos que permitan reducir alguno de los problemas asociados al uso de estas tecnologías, como la *Legionella*.

Con la publicación de esta monografía se pretende, por una parte, dar a conocer la tecnología del enfriamiento evaporativo como alternativa eficiente y sostenible, que puede ser utilizada en el acondicionamiento de los espacios, útil para alcanzar el objetivo de la descarbonización de los edificios. Por otra parte, se busca transmitir la experiencia investigadora que el grupo ha desarrollado en la realización de nuevos prototipos, así como la caracterización de los mismos.

En la monografía se abordarán todos los conceptos fundamentales y se desarrollarán todas las tecnologías y aplicaciones de estos sistemas, así como su combinación con otras tecnologías, como la hibridación con sistemas convencionales de compresión mecánica, que permitan reducir la carga térmica que tienen que vencer y, por tanto, su consumo de energía y la carga de refrigerante necesaria en los equipos.

También se presentará el estado de la técnica y los prototipos desarrollados por el grupo en los diferentes proyectos y trabajos de investigación, aportando las características operativas de los mismos, la forma de caracterizar la eficiencia energética de su integración en un sistema de climatización y los resultados de investigación obtenidos durante su caracterización.

NOTACIÓN

N: número de variables de la regla de las fases de Gibbs.
C: número de componentes de la regla de las fases de Gibbs.
F: número de fases de la regla de las fases de Gibbs.
T: temperatura (°C), siendo:

T_s la temperatura seca o de bulbo seco (°C).
 T_{SatAd} la temperatura de saturación adiabática (°C).
 T_{bh} la temperatura de bulbo húmedo (°C).
 $T_{\text{H}_2\text{O}_e}$ la temperatura del agua a la entrada del proceso (°C).
 $T_{\text{H}_2\text{O}_s}$ la temperatura del agua a la salida del proceso (°C).
 $T_{\text{aire } e}$ la temperatura del aire a la entrada del proceso (°C).
 $T_{\text{aire } s}$ la temperatura del aire a la salida del proceso (°C).
 T_{evap} la temperatura del aire tras el enfriador evaporativo (°C).
 $T_{\text{imp } e}$ la temperatura del aire de impulsión a la entrada del proceso (°C).
 $T_{\text{imp } s}$ la temperatura del aire de impulsión a la salida del proceso (°C).
 T_r la temperatura radiante (°C).

w: humedad específica del aire húmedo ($\text{kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{aire seco}}$), siendo:

w_{satad} la humedad específica de saturación adiabática ($\text{kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{aire seco}}$).
 w_e la humedad específica a la entrada del proceso ($\text{kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{aire seco}}$).
 w_s la humedad específica a la salida del proceso ($\text{kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{aire seco}}$).

m: masa (kg).

P: presión (Pa), siendo:

P_v la presión parcial de vapor de agua (Pa).
 P_{atm} la presión atmosférica (Pa).
 P_{sat} la presión de saturación (Pa).
 $\Delta P_{\text{H}_2\text{O}}$ el incremento de presión en el agua (Pa).
 ΔP_{aire} el incremento de presión en el aire (Pa).

HR: humedad relativa (%), siendo:

HR_{imp} la humedad relativa del aire impulsión (%).

h: entalpía específica del aire húmedo (kJ/kg), siendo:

h_{as} la entalpía específica del aire seco (kJ/kg).
 h_v la entalpía específica del vapor de agua (kJ/kg).

h_{SatAd} la entalpía específica de saturación adiabática (kJ/kg).

h_e la entalpía específica del aire húmedo a la entrada del proceso (kJ/kg).

$h_{\text{H}_2\text{O}_e}$ la entalpía específica del agua a la entrada del proceso (kJ/kg).

h_s la entalpía específica del aire húmedo a la salida del proceso (kJ/kg).

$h_{\text{H}_2\text{O}_s}$ la entalpía específica del agua a la salida del proceso (kJ/kg).

$h_{\text{imp } e}$ la entalpía específica del aire de impulsión a la entrada del proceso (kJ/kg).

$h_{\text{imp } s}$ la entalpía específica del aire de impulsión a la salida del proceso (kJ/kg).

$h_{\text{sat } s}$ la entalpía específica del aire saturado a la salida del proceso (kJ/kg).

$h_{\text{sat } e}$ la entalpía específica del aire saturado a la entrada del proceso (kJ/kg).

U: energía interna (J).

V: volumen (m^3).

Cp: calor específico (J/kg K), siendo:

Cp_{as} el calor específico del aire seco (J/kg K).

Cp_v el calor específico del vapor de agua (J/kg K).

Cp_{ah} el calor específico del aire húmedo (J/kg K).

$Cp_{\text{H}_2\text{O}}$ el calor específico del agua (J/kg K).

Cp_{aire} el calor específico del aire (J/kg K).

C_L : calor latente de cambio de fase del agua (kJ/kg).

Q: transferencia de calor (kJ), siendo:

$Q_{\text{convección}}$ la transferencia de calor por convección (kJ).

$Q_{\text{evaporación}}$ la transferencia de calor por evaporación (kJ).

h_c : coeficiente de transferencia de calor por convección ($\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$), siendo:

$h_{c \text{ imp}}$ el coeficiente de transferencia de calor por convección del aire de impulsión ($\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$).

$h_{c \text{ agua}}$ el coeficiente de transferencia de calor por convección del agua ($\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$).

A: área, superficie, sección (m^2); siendo:

A_T : Sección de transferencia de calor (m^2).

A_c : Sección del flujo (m^2).

k_m : coeficiente de transferencia de masa (m/s).

ρ : densidad (kg/m³), siendo:

ρ_{as} : densidad del aire seco (kg/m³).

k' : coeficiente de intercambio másico (kg/s m²).

Le : número de Lewis (adimensional).

\dot{m} : flujo de masa (kg/s), siendo:

\dot{m}_{as} el flujo de masa de aire seco (kg/s).

\dot{m}_{as_e} el flujo de masa de aire seco a la entrada del proceso (kg/s).

\dot{m}_{as_s} el flujo de masa de aire seco a la salida del proceso (kg/s).

\dot{m}_{aire} el flujo de masa de aire (kg/s).

\dot{m}_{H_2O} el flujo de masa de agua (kg/s).

$\dot{m}_{H_2O_e}$ el flujo de masa de agua a la entrada del proceso (kg/s).

$\dot{m}_{H_2O_s}$ el flujo de masa de agua a la salida del proceso (kg/s).

$\dot{m}_{H_2O_{evap}}$ el flujo de masa de agua evaporada en el proceso (kg/s).

\dot{m}_{imp} el flujo de masa de aire de impulsión (kg/s).

\dot{m}_{sat} el flujo de masa de aire saturado (kg/s).

\dot{V} : caudal volumétrico (m³/s), siendo:

\dot{V}_{H_2O} : el caudal volumétrico de agua (m³/s).

\dot{V}_{aire} el caudal volumétrico de aire (m³/s).

W : consumo de energía (kW/h), siendo:

$W_{operación}$ el consumo de energía de funcionamiento del sistema (kW/h).

W_{bomba} el consumo de energía de la bomba de impulsión (kW/h).

$W_{ventilador}$ el consumo de energía del ventilador (kW/h).

E : energía (kWh), siendo:

$E_{útil}$ la energía útil (kWh).

$E_{enfriamiento}$ la energía empleada para enfriamiento/refrigeración (kWh).

R_T : resistencia térmica (m²K/W), siendo:

$R_{T_{imp}}$ la resistencia térmica del aire de impulsión (m²K/W).

$R_{T_{mat}}$ la resistencia térmica del material (m²K/W).

$R_{T_{agua}}$ la resistencia térmica del agua (m²K/W).

λ : conductividad térmica (W/m K).

e : espesor (m).

U : coeficiente global de transferencia de calor (W/m² K).

NUT : número de unidades de transferencia (adimensional).

ϵ : eficiencia (adimensional).

Cr : Relación de Capacidades Caloríficas (adimensional).

j_{agua} : difusión molar del agua en el aire (mol s/m²).

D : difusividad másica (m²/s), siendo:

$D_{agua/aire}$: difusividad másica del agua en el aire (m²/s).

C : grado de concentración (mol/m³).

C_{vapor} : grado de concentración del vapor (mol/m³).

C_{sal_e} : grado de concentración del sales a la entrada del proceso (mol/m³).

C_{sal_s} : grado de concentración del sales a la salida del proceso (mol/m³).

R : constante universal de los gases.

Sh : número de Sherwood (adimensional).

Re : número de Reynolds (adimensional).

Sc : número de Schmidt (adimensional).

v : velocidad (m/s), siendo:

v_m la velocidad media (m/s).

v : volumen específico (m³/kg).

σ : Reducción de sección/área/superficie en tanto por uno.

f : Factor de fricción.

I_T : radiación solar incidente total (W/m²).

1. INTRODUCCIÓN. USO DE ENERGÍA LIMPIA PARA EL ACONDICIONAMIENTO DE AIRE

1.1. Introducción

La energía es una de las principales bases sobre las que se sustenta la sociedad moderna. Su disponibilidad a bajo coste económico hasta la década de 1970 ha permitido un desarrollo tecnológico hasta nuestros días con una mejora del bienestar social en los países industrializados. Por otra parte, los recursos energéticos que han soportado esta evolución, mayoritariamente combustibles de origen fósil, son recursos limitados, cuya utilización ha seguido una tendencia exponencial en las últimas décadas. Esta situación, debido a la problemática del cambio climático ha hecho que en las últimas décadas haya surgido un debate en torno a la sostenibilidad de este modelo y una preocupación creciente acerca de una problemática energética, socioeconómica y medioambiental [1].

El marco de la política energética y medio ambiental en España está determinado por la Unión Europea (UE), que, a su vez, se encuentra condicionada por el Acuerdo de París, alcanzado en 2015 sobre el reto del cambio climático, cuyo objetivo fundamental será reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, aumentar la proporción de renovables en el sistema y mejorar la eficiencia energética en la Unión en el horizonte 2030.

A ello hay que añadir que la Comisión Europea actualizó el 28 de noviembre de 2018 su hoja de ruta hacia una descarbonización sistemática de la economía con la intención de convertir a la Unión Europea en neutra en carbono en 2050 [2].

El Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030 [3] identifica los retos y oportunidades a lo largo de las cinco dimensiones de la Unión de la Energía: la descarbonización, incluidas las energías renovables; la eficiencia energética; la seguridad energética; el mercado interior de la energía y la investigación, innovación y competitividad.

En las regiones desarrolladas, el consumo de energía final se distribuye principalmente entre tres grandes ámbitos económicos: la industria, el transporte y la edificación, distinguiendo entre edificios terciarios (oficinas, hostelería, hospitales, educación, etc.) y edificios residenciales. La distribución

del consumo entre los sectores varía en función de las áreas geográficas y sus condiciones económicas, culturales, climatológicas, etc. Sin embargo, es indudable el peso de la edificación como gran consumidor de energía ya que, en la Unión Europea representa el 40 % del consumo total [2], y es responsable del 28 % de las emisiones de CO₂ asociadas al consumo energético a nivel mundial [4].

El consumo de la edificación en la UE no es homogéneo: Alemania, Francia, Reino Unido, Italia y España concentran aproximadamente 2/3 de la superficie total construida, con un consumo medio específico anual repercutido en 2012 de 210 kWh/m², y con grandes diferencias entre el sector terciario (286 kWh/m²) y el sector residencial (185 kWh/m²) [5].

En nuestro país, tres de cada cuatro toneladas de gases de efecto invernadero (GEI) se originan en el sistema energético [3], por lo que su descarbonización es un elemento central sobre la que debe desarrollarse la transición energética. Esta transformación incidirá de manera positiva en la eficiencia energética.

En mayo de 2018, la Directiva 2018/844/UE [6] ha introducido un nuevo objetivo aplicado a los edificios para conseguir que estos tengan una alta eficiencia energética y estén descarbonizados antes de 2050, facilitando la transformación económicamente rentable de los edificios existentes en edificios de consumo de energía casi nulo. Entre las mejoras de la eficiencia energética está la renovación de instalaciones térmicas de calefacción y aire acondicionado.

Actualmente, y con el fomento de los edificios de consumo de energía casi nulo (nZEB) en la UE, existe una tendencia hacia la electrificación del sector de la edificación que puede favorecer un futuro más sostenible desde el punto de vista medioambiental, siempre que venga acompañada de una apuesta por la electricidad de origen renovable y una importante reducción del uso de combustibles fósiles en la generación [7]. Sin embargo, la mejora de la eficiencia energética de los edificios debe centrarse en la reducción de su consumo energético, partiendo de la reducción de su demanda energética y siguiendo con la mejora del rendimiento de sus

instalaciones y con el uso de fuentes energéticas gratuitas o de alta eficiencia. En este sentido, se estima que, respecto a la situación actual, se pueden

obtener reducciones del 20 % [8]. Los métodos de reducción del consumo energético de los edificios (Figura 1.1) se pueden clasificar en:

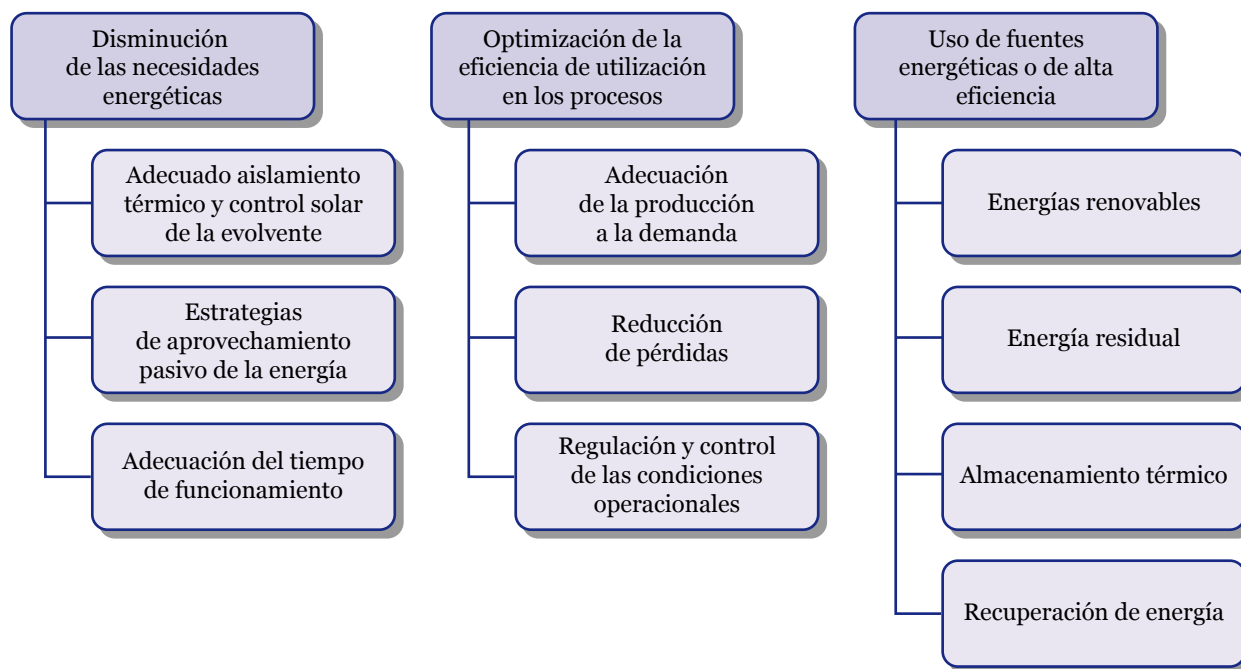


Figura 1.1. Estrategias de mejora de la eficiencia energética de los edificios [9].

El Acondicionamiento de Aire o Climatización (calefacción, refrigeración y ventilación) tiene como función principal la generación y el mantenimiento de un adecuado nivel de confort para los ocupantes de un ambiente cerrado o bien la garantía del mantenimiento de un conjunto de condiciones ambientales para el desarrollo de un proceso o actividad ambiental dentro de un recinto. Los sistemas de climatización suponen el 50 % del consumo energético total de los edificios en los países desarrollados [10], lo cual justifica la necesidad y conveniencia de abordar la mejora del uso de la energía asociado a estos sistemas.

El aire acondicionado empezó a ser una reconocida rama de la ingeniería en 1911. Sus principios eran el control de la temperatura, humedad, pureza y movimiento del aire en un espacio cerrado independientemente de las condiciones del aire exterior. En un principio se extendió en el ámbito de los espacios comerciales, culturales e industriales, pero en los años setenta, aproximadamente 71 millones de viviendas tenían aire acondicionado centralizado.

La crisis del petróleo de 1973 focalizó la atención sobre la eficiencia de la energía. Los sistemas de climatización tenían que diseñarse y funcionar

para alcanzar un balance adecuado en términos de confort, calidad de aire y consumo energético. Las instalaciones con bajo costo de operación empezaron a ser la mayor preocupación en el diseño para los ingenieros. Se inventaron nuevas formas de recuperación de energía térmica, y surgió un interés por el desarrollo de nuevas tecnologías en climatización de bajo consumo de energía.

Debido a la demostración de que los clorofluorocarbonos (CFC) evacuados a la atmósfera desprendían iones de cloro destruyendo moléculas de la capa de ozono (O_3), se evidenció el impacto medioambiental que supone el uso de ciertos refrigerantes como los CFCs y los hidroclorofluorocarbonos (HCFC). Por lo tanto, se llevaron a cabo diversas acciones internacionales para reducir las emisiones de estos contaminantes químicos a la atmósfera. Esto dio como resultado nuevas investigaciones para reemplazar los refrigerantes existentes en el ámbito de la climatización, problema que hoy en día se sigue investigando. Finalmente, estas evidencias llevaron a que, en 1987, varios países firmaran el Protocolo de Montreal relativo a las sustancias que agotan la capa de ozono con el fin de intentar reducir, escalonadamente, la producción de CFCs y otras sustancias químicas que destruyen el ozono.

Actualmente, nuestra sociedad tiene un gran reto frente al cambio climático, siendo el efecto invernadero uno de los factores importantes del mismo. Además de las emisiones de CO₂ asociadas al consumo energético, los refrigerantes químicos que se utilizan en los equipos de climatización también contribuyen en gran medida a ello. Es por ello por lo que se plantea a nivel internacional la necesidad de reducir y sustituir estos refrigerantes promoviendo un cambio hacia nuevas tecnologías de climatización de forma que se consiga una descarbonización global. Este es el objetivo fundamental del Pacto Verde Europeo para el año 2050 [11].

En este sentido, en la Unión Europea existen diferentes normativas que afectan directamente al medioambiente. Entre ellas se encuentra el Reglamento (EU) 517/2014 [12] y su incorporación a la normativa nacional mediante el Real Decreto 552/2019 [13], que implica a las instalaciones de aire acondicionado y refrigeración, con disposiciones legislativas relativas a los Gases Fluorados de Efecto Invernadero (GFEI). El objetivo de ese reglamento es proteger el medio ambiente mediante la reducción de las emisiones de GFEI, para ello: establece normas sobre contención, uso, recuperación y destrucción de gases fluorados de efecto invernadero; establece condiciones a la comercialización de productos y aparatos específicos que contengan GFEI o cuyo funcionamiento dependa de ellos; establece condiciones a usos específicos de GFEI y fija límites cuantitativos para la comercialización de hidrofluorocarburos (HFCs).

Otro punto importante derivado de la reducción gradual de HFCs es que hay que buscar alternativas a los refrigerantes con un alto PCA (Potencial de Calentamiento Atmosférico). En este contexto se ha creado un impuesto de GFEI, que es un tributo de naturaleza indirecta que recae sobre el consumo de esos gases y grava, en fase única, el consumo de estos productos atendiendo al potencial de calentamiento atmosférico.

Finalmente, en España el Código Técnico de la Edificación (CTE), cuyo Documento Básico de Ahorro de Energía (DB-HE) ha sido actualizado en 2019 [14], regula diversos aspectos técnicos de la edificación. El documento HE 2 de Condiciones de las instalaciones térmicas, que se desarrolla en el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE) [15], establece los requisitos y condiciones que deben cumplir las instalaciones destinadas a atender la demanda de bienestar térmico e higiene, como es el caso de las correspondientes a calefacción, aire acondicionado y agua caliente

sanitaria, para conseguir un uso racional de la energía.

En esta línea, las exigencias en eficiencia energética que establece el RITE se refieren, entre otras, a la mejora del rendimiento energético en sistemas de calefacción y aire acondicionado, así como, la incorporación de subsistemas de recuperación de energía y el aprovechamiento de energías residuales.

Por otro lado, los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), las nuevas políticas energéticas y ambientales, así como la implantación de la economía circular, imponen la necesidad de diseñar nuevas tecnologías de climatización que permitan conseguir un elevado confort térmico y una alta Calidad Ambiental Interior (IEQ) de los espacios habitables, con el menor consumo energético e impacto ambiental.

1.2. Aspectos clave para desarrollos presentes y futuros del sector de la climatización

Para conseguir la sostenibilidad en el sector de la climatización, son necesarios los desarrollos, presentes y futuros, en aspectos tales como:

- **Diseño ecológico:** los productos relacionados con la energía representan una gran proporción del consumo de recursos naturales y de energía en la UE y tienen otros impactos importantes en el medio ambiente. Es necesario actuar durante la fase de diseño de los productos relacionados con la energía, ya que resulta que la contaminación provocada durante el ciclo de vida del producto se determina en esta fase y en ese momento se comprometen la mayoría de los gastos correspondientes. Los productos consumidores de energía, entre los que se encuentran los equipos de climatización, deben cumplir unos requisitos mínimos de eficiencia energética, conocidos como *requisitos de diseño ecológico*, antes de ser introducidos en el mercado, siguiendo las indicaciones de la Directiva 2009/125/EC [16].
- **Etiquetado energético:** el etiquetado energético permite a los clientes tomar decisiones fundadas sobre el consumo energético de los productos relacionados con la energía. La información sobre productos eficientes y sostenibles relacionados con la

energía constituye una significativa contribución al ahorro de energía y a la reducción de la factura energética, promoviendo al mismo tiempo la innovación y las inversiones en la producción de productos cada vez más eficientes desde el punto de vista energético. El Reglamento (UE) 2017/1369 [17] sienta las bases para el etiquetado de los productos relacionados con la energía, facilitando información básica sobre eficiencia energética —así como sobre el consumo de energía y otros recursos— con el fin de ayudar a los clientes en sus decisiones de compra.

- **Residuos:** la política medioambiental de la Unión Europea tiene como objetivos la conservación, la protección y la mejora de la calidad del medio ambiente, la protección de la salud de las personas y la utilización prudente y racional de los recursos naturales. Como el mercado sigue expandiéndose y los ciclos de innovación se hacen más breves, la sustitución de los aparatos se acelera, convirtiendo rápidamente a los aparatos eléctricos y electrónicos en una creciente fuente de residuos. Conforme la Directiva 2012/19/UE [18], traspuesta mediante el Real Decreto 110/2015 [19], resulta especialmente importante avanzar en un tipo de diseño y producción de aparatos eléctricos y electrónicos, entre los que se incluyen los equipos de climatización, que tenga plenamente en cuenta y facilite la reparación de estos productos y su posible actualización, así como su reutilización, desmontaje y reciclado.
- **Energía renovable:** el uso de energía procedente de fuentes renovables es vital cuando se habla de electrificación del sistema y los equipos de climatización tienen mucho que decir en ese aspecto, sobre todo para conseguir nZEB. En este ámbito es de especial relevancia la tecnología Bomba de Calor, ya que es capaz de calentar y enfriar un fluido caloportador de una forma eficiente y respetuosa con el medio ambiente utilizando la energía aerotérmica, geotérmica o hidrotérmica, según la Directiva (UE) 2018/2001 [20]. El Anexo VII establece el método de cálculo de la cantidad de energía renovable utilizada por las bombas de calor que complementa las directrices establecidas en la Decisión de la Comisión 2013/114/EU [21].

Respecto al impulso de las energías renovables, cabe destacar que el Gobierno de España en su Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030 [3] plantea alcanzar en 2030 una presencia de las energías renovables sobre el uso final de la energía del 42 % debido a la inversión prevista en renovables eléctricas y térmicas, así como a la notable reducción en el consumo final de energía. Con el avance de las renovables en el periodo 2021-2030 se prevé un incremento de aportación renovable de las bombas de calor de 629 a 3523 ktep.

- **Eficiencia energética:** la Unión Europea se ha comprometido a establecer un sistema energético, sostenible, competitivo y descarbonizado de aquí a 2050. Para alcanzar ese objetivo, la Directiva (UE) 2018/844 [6] establece una tasa media anual de renovación del parque inmobiliario existente del 3 %, de forma que se transformen los edificios existentes en edificios de consumo de energía casi nulo. En este sentido, la eficiencia energética de la climatización es un elemento clave ya que actualmente el consumo de energía final de la Unión Europea que se destina a calefacción y refrigeración de edificios es del 40 % [11].
- **Refrigerantes:** sabiendo del impacto ambiental de los fluidos refrigerantes, actualmente está prohibido el uso de CFCs y en un futuro próximo se prohibirá el uso de HCFCs. Las alternativas que se plantean son los hidrofluorocarbonos (HFC) y los fluidos refrigerantes naturales como el amoníaco, los hidrocarburos lineales o cíclicos y sus mezclas, entre otros. El Reglamento (EU) 517/2014 [12], y su incorporación a la normativa nacional mediante el Real Decreto 552/2019 [13], establecen normas sobre contención, uso, recuperación y destrucción de gases fluorados de efecto invernadero, así como limitación de su comercialización y fomento del uso de refrigerantes con bajo Potencial de Calentamiento Atmosférico (PCA).

Estos son solo algunos de los aspectos más relevantes a tener en cuenta, que dejan claro que el sector de la climatización está muy regulado, a la vez que concienciado de su gran protagonismo en las políticas de descarbonización y en la electrificación del sistema. A lo anterior, hay que añadir, que es una industria clave para contribuir a los tres obje-

vos prioritarios de la UE en materia de cambio climático: aumento de eficiencia energética, uso de energía procedente de fuentes renovables y reducción de emisiones de CO₂, favoreciendo, además, el progreso de algunos de los ODS, dirigidos a proteger el planeta y a equilibrar la sostenibilidad, desde el punto de vista social, económico y medioambiental.

A la hora de seleccionar un sistema de climatización, el proyectista, además de apoyarse en el Reglamento de Instalaciones Térmicas de los Edificios (RITE) [15], tiene la responsabilidad de elegir distintos sistemas tecnológicos eficientes que presenten bajo impacto medioambiental y que funcionen conforme a las condiciones establecidas. Así mismo, estos sistemas se deben dimensionar conforme a la demanda del edificio, ubicarse adecuadamente en el edificio y proporcionar al propietario la mejor relación entre la inversión económica, el coste de funcionamiento y la fiabilidad del sistema [22].

1.3. Aprovechamiento de recursos energéticos gratuitos en climatización

En el contexto energético actual, además de reducir la demanda energética de los edificios, es fundamental reducir el consumo energético de las instalaciones de climatización, ya sea por la mejora de su rendimiento energético como por el aprovechamiento de recursos energéticos gratuitos, considerando también aspectos medioambientales como la reducción de las emisiones de CO₂ o del uso de gases fluorados de efecto invernadero.

Los sistemas de climatización con mayores rendimientos energéticos requieren menos consumo de energía eléctrica para proporcionar la misma energía térmica, lo que reduce las emisiones de gases de efecto invernadero debido a la reducción del consumo de energía primaria no renovable.

Una mejora tecnológica que permite aumentar el rendimiento energético de los equipos a la vez que reduce la cantidad de refrigerante necesaria es la utilización de microcanales en los intercambiadores de calor, así como su acoplamiento hidrónico. Esta tecnología permite reducir el tamaño de los intercambiadores, aumentando la compacidad de los equipos y reduciendo la carga de refrigerante de estos [23].

Existen múltiples recursos para reducir el consumo energético de las instalaciones de climati-

zación, entre ellos destacan los sistemas de enfriamiento gratuito (*free-cooling*), los sistemas de recuperación de energía residual y los sistemas de enfriamiento evaporativo como técnicas de bajo consumo energético que aprovechan fuentes energéticas gratuitas [8].

Los sistemas de enfriamiento gratuito reducen la energía necesaria para la adecuación higrotérmica del aire de impulsión de ventilación de los espacios debido al uso del aire exterior. La aplicación más directa consiste en la introducción del aire exterior sin acondicionar en el espacio para vencer las cargas térmicas, lo cual redundará en una mejora en la Calidad del Aire Interior (IAQ) debido al aumento del caudal de ventilación.

Los recuperadores de energía en los sistemas de climatización van a conciliar calidad del aire interior con ahorro energético, ya que permiten aportar los caudales de ventilación requeridos para renovación de aire sin penalizar energéticamente los sistemas de acondicionamiento higrotérmico, simplemente preacondicionando este flujo de aire mediante el aprovechamiento de la energía residual del aire extraído para la renovación.

Los equipos de recuperación del calor residual son generalmente intercambiadores térmicos más o menos complejos, pudiendo darse en ellos tanto flujos de calor como de masa. Sin embargo, estos sistemas no dejan de estar integrados dentro de un proceso de acondicionamiento más global, por lo que deben plantearse como medios de reducción del consumo energético de esta instalación suponiendo unos costes económicos aceptables de inversión en la misma.

Los sistemas de enfriamiento evaporativo se basan en el fenómeno natural de enfriamiento y humidificación del aire debido a la evaporación del agua que se produce al ponerla en contacto con una corriente de aire con bajo contenido en humedad.

A pesar de los múltiples usos que tiene el enfriamiento evaporativo, tiene un especial interés en la aplicación en el acondicionamiento higrotérmico de los edificios debido a sus bajos porcentajes de consumo eléctrico en comparación con otros sistemas convencionales, así como su relativa simplicidad constructiva, operativa y de mantenimiento unido a su bajo coste y a su impacto ambiental, ya que no requiere del uso de refrigerantes para su funcionamiento [24].