

la caracterización energética del parque de edificios actual, así como la incertidumbre en la caracterización de la “realidad” (balances AIE), consideramos que los resultados arrojados por el proceso de calibrado muestran una buena consistencia del modelo desarrollado para describir la estructura energética incluso del parque de edificios existente, lo cual da soporte a la proyección de escenarios que realizamos a partir de la situación actual para generar los contextos BAU y E3.0 en el año 2050.

En efecto, el objetivo del modelo que hemos desarrollado es el predecir las implicaciones de distintas hipótesis de entrada (tamaño de parque de edificios, condiciones de uso, tecnologías empleadas, etc.) sobre el consumo energético del sector edificación en el año 2050<sup>622</sup>, tanto para un contexto BAU como para un contexto E3.0, y el grado de detalle del modelo desarrollado nos proporciona una gran solidez para correlacionar las distintas hipótesis de entrada con su implicación energética. Las incertidumbres asociadas a las variables de entrada y la caracterización de la “realidad” en el inicio del escenario, se van diluyendo a medida que evoluciona a lo largo del periodo de análisis, al distanciarse de la situación concreta actual, de tal forma que a partir de un cierto punto el modelo ya no se ve afectado por estas incertidumbres, y actúa, tan solo, como herramienta para correlacionar hipótesis sobre las variables de entrada y su implicación energética. De hecho, algunas de las fuentes de incertidumbre existentes en la caracterización actual del sector edificación, como el porcentaje de edificios en uso y el coeficiente de ajuste por falta de confort y uso, cabe esperar que se vayan internalizando a lo largo del periodo de tiempo considerado hasta el año 2050, a medida que vayamos poniendo en uso el exceso de superficie construida durante estos últimos años y de

que se vaya incorporando la cobertura de esas demandas potenciales de servicios.

A partir de este punto, vamos a centrarnos pues en el instante final del escenario (año 2050), aunque según la información generada proporcionemos alguna información de cómo podría desarrollarse la transición desde la situación actual.

### 3.7.6 Componentes de demanda energética y potencial de mejora

Recopilamos en este punto, la caracterización de los componentes básicos que determinarán la demanda energética de los edificios, con indicación de los niveles de eficiencia alcanzables tanto en los contextos BAU como en el E3.0.

La aplicación de medidas de eficiencia en el sector edificación, así como la evolución que cabe esperar del uso de la energía en los edificios, conduce a una modificación radical de la estructura de demanda de energía en este sector. En efecto, el predominio actual de demanda de energía para cubrir las necesidades de climatización, evoluciona hacia una situación en que dicha demanda pasa a ser minoritaria, y queda fuertemente dominado el consumo de energía de los edificios por la demanda de los equipamientos en ellos implementados. Incluso otros elementos de demanda de gran peso actual como la iluminación, se reducen gracias a las medidas de eficiencia de lámparas y luminarias, y a la incorporación de las opciones de iluminación natural y de inteligencia. Pero los equipamientos, con una tendencia creciente a la demanda de sus servicios, tiene una evolución del consumo de energía que en un contexto BAU podría resultar incluso creciente respecto a la situación actual, y en el contexto E3.0 su

**622** De hecho, el objetivo de este estudio no es el de evaluar el proceso de transición desde la actualidad hasta el año 2050, sino el analizar las implicaciones que en el año 2050 adquiere el haber evolucionado por una senda BAU o por una eficiente. Sin embargo, a lo largo del informe proporcionamos como resultado secundario distintas opciones de cómo podría desarrollarse la transición desde la situación actual hasta el año 2050, pues de su análisis también se desprenden algunas conclusiones interesantes.

menor reducción de consumo respecto a otras componentes de demanda, a menudo les convierte en la componente dominante de la estructura de la demanda total. Por otro lado, si bien es cierto que en muchos equipamientos existe todavía un importante potencial de mejora de su eficiencia, dado que hasta la fecha las consideraciones de eficiencia energética no han resultado prioritarias en su diseño, en otros equipamientos de proceso (como los implementados en hospitales, restaurantes, lavanderías, etc.) el margen de mejora puede resultar bastante más limitado.

En un contexto en el cual la demanda de los edificios queda dominada por el consumo energético de los equipamientos en ellos instalados, aspectos como la inteligencia en la gestión de la operación de estos equipamientos<sup>623</sup> y la posibilidad de actuar sobre ellos de forma inteligente, para potenciar la gestión de la demanda, pasa a ser un aspecto fundamental del enfoque E3.0. Y desde el punto de vista de elección de tecnologías y despliegue de infraestructuras energéticas, el hecho de que los equipamientos consuman electricidad y pasen a ser la componente dominante de la estructura energética, sin duda condiciona aspectos como la electrificación del resto de componentes de demanda.

Un punto que merece mención explícita es el tratamiento que hemos hecho de algunas de las medidas pasivas potencialmente aplicables para mejorar el comportamiento energético del edificio, por lo que concierne principalmente a la elección de la forma y orientación de los edificios. Estos aspectos de diseño, para un edificio particular, pueden tener un efecto importante sobre su demanda de energía, y de hecho constituyen habitualmente los primeros grados de libertad con los que hay que jugar para optimizar su comportamiento energético. Sin embargo, son aspectos que están muy

condicionados a las restricciones que aplican sobre cada caso particular, y por tanto, que resultan difíciles de incorporar en un proceso de análisis del conjunto del sector edificación como el aquí abordado, sin llegar a unos resultados excesivamente optimistas. En efecto, restricciones como condicionantes específicos del diseño del edificio, tanto por funcionalidad como por otros criterios arquitectónicos, así como las restricciones que introduce el entorno urbano en el que se va a desarrollar el edificio por lo que respecta a la forma y orientación de las parcelas, llegan a condicionar de forma significativa la forma y orientación que finalmente se proporciona a un edificio<sup>624</sup>. La propia planificación urbanística ha estado tradicionalmente desligada de las consideraciones energéticas, y las decisiones implementadas en los planes generales de ordenación urbana condicionan en gran medida y durante muchos años aspectos con fuertes implicaciones energéticas, como la forma y orientación de los edificios desarrollados bajo el paraguas de esa planificación, los sombreados estacionales entre edificios<sup>625</sup>, y el patrón de flujo del aire por el entramado urbano<sup>626</sup>. El urbanismo bioclimático, mediante la incorporación de estos elementos a la planificación urbana, podría facilitar mucho la transición hacia un contexto de eficiencia en el sector edificación, y en el caso de ampliar su ámbito de actuación para evolucionar hacia un urbanismo sostenible, podría tener importantes impactos beneficiosos sobre otros sectores energéticos de gran peso como el transporte.

En el ámbito de este estudio, no se ha incorporado la optimización de elementos de forma y orientación en el modelo del sector edificación por varios motivos:

- Limitación del alcance del trabajo, que excluía completamente la posibilidad de optimizar

**623** Eliminar o reducir sustancialmente consumos "parásitos" como los de *stand-by* o los asociados a condiciones de bajo uso.

**624** En este contexto, los criterios energéticos deben interactuar con otros criterios de diseño para influir sobre la forma y orientación que finalmente se adopte, de tal forma que el resultado final refleje, por lo menos, un cierto nivel de compromiso con las prestaciones energéticas. Para que esto sea así, es imprescindible que los mecanismos de incentiviación de la eficiencia reaccionen ante elementos de diseño tan importantes como la forma del edificio. Lamentablemente, la calificación energética de edificios terciarios, al emplear una escala de calificación relativa, es totalmente insensible a la forma y orientación del edificio, motivo por el cual no permite que las consideraciones energéticas participen en la determinación final de la forma y orientación del edificio durante la etapa de diseño.

**625** Que a su vez condicionan tanto su demanda de refrigeración como la de calefacción (aportes solares pasivos), así como la posibilidad de integración de sistemas solares en la envolvente del edificio.

**626** Que a su vez condiciona tanto el potencial de aplicación de estrategias de ventilación natural, de implementación de estrategias de refrigeración pasiva, y las pérdidas convectivas de la envolvente de los edificios al aire.

cada uno de los modelos de edificio al representar a los distintos modos considerados en términos de forma y orientación para cada emplazamiento climático.

- Necesidad de representar con un solo modelo de edificio cada uno de los modos considerados, de tal forma que el resultado pudiera considerarse representativo del conjunto del parque de edificios. Dado que en el pasado el despliegue del urbanismo bioclimático ha sido prácticamente nulo, y puesto que esta planificación urbanística energéticamente insensible condicionará gran parte del parque de edificios existente en el año 2050, parece más correcto representar el conjunto del parque con un modelo en que no se han optimizado los grados de libertad de forma y orientación.
- El resultado al que se llega al no incorporar las consideraciones del urbanismo bioclimático y algunos de los elementos del diseño solar pasivo<sup>627</sup> es conservador, dejando un margen de mejora para el diseño de cada edificio particular que permitirá facilitar la transición hacia un contexto E3.0.

Sin embargo, otros elementos pasivos, como son los espesores de aislante, las roturas de puente térmico, la inercia térmica, las ganancias solares para calefacción, las protecciones solares, los techos fríos, la refrigeración por ventilación nocturna, la iluminación natural, etc., sí que se han incorporado en el contexto E3.0, e incluso se han potenciado más allá de su potencial pasivo puro mediante la incorporación de inteligencia.

Por lo que respecta a algunos elementos pasivos tradicionales, como pueden ser los aleros para gestionar estacionalmente el sombreado sobre los acristalamientos del edificio, no aparecen incorporados explícitamente en el

contexto E3.0 por haber sido sustituidos de cara al año 2050 por componentes inteligentes de la envolvente que permiten incrementar el rendimiento con el que se desarrollan las funciones de estos elementos. En efecto, en el diseño de un elemento pasivo como un voladizo, siempre es necesario llegar a un compromiso entre sus efectos positivos (limitación de aportes solares en régimen de refrigeración) y los negativos (reducción de aportes solares pasivos en época de calefacción), de tal forma que como consecuencia de su rigidez en las estancias intermedias siempre conllevan una cierta penalización, aunque su efecto anual neto, si están bien diseñados, siempre sea positivo (García-Casals X., 2003-1). En el contexto E3.0, la aparición de elementos activos inteligentes<sup>628</sup> permiten obtener un beneficio mucho más elevado del aspecto positivo (mayor grado de protección solar) sin tener que incurrir en las penalizaciones asociadas a la rigidez de los elementos tradicionales, por responder de forma dinámica a las necesidades reales<sup>629</sup> de cada instante. Sin embargo, esto no quiere, ni mucho menos, decir que los elementos pasivos tradicionales no puedan y deban desempeñar su papel en el proceso de transición hacia el contexto E3.0, e incluso ocupar su nicho en ciertos tipos de edificios de cara al año 2050.

Otro punto que merece ser comentado explícitamente es el tema de las optimizaciones de costes, en relación al equilibrio entre aplicación de medidas de eficiencia y generación de energía. Es decir: hasta qué punto queda justificada la aplicación de medidas de eficiencia y a partir de qué punto resulta más adecuado desplegar una capacidad de generación adicional para cubrir el remanente de la demanda. En este estudio no hemos acometido un análisis detallado de este aspecto, por quedar fuera del alcance del trabajo a desarrollar, aunque sí que proporcionaremos

<sup>627</sup> Que por otro lado, tal y como comentábamos anteriormente, son muy dependientes de cada caso particular y por tanto difícilmente generalizables al conjunto del parque de edificios.

<sup>628</sup> Como pueden ser los acristalamientos dinámicos que modifican sus características termo-ópticas en respuesta a las necesidades reales de cada instante.

<sup>629</sup> Demanda de calefacción o refrigeración, necesidad de incrementar el aislamiento, requerimientos de iluminación natural, etc.

alguna evaluación cuantitativa para contextualizar y justificar las decisiones adoptadas.

A falta de desarrollar el proceso de optimización económica, la aproximación que hemos adoptado para establecer los niveles de eficiencia desplegados se apoya en los siguientes planteamientos:

- Para aquellos elementos sobre los que hemos desarrollado un estudio paramétrico (como los espesores de aislante), hemos adoptado como nivel de eficiencia a desplegar, aquel que corresponde al codo anterior a que se sature su efecto sobre el ahorro de energía, que de forma práctica hemos definido como aquel valor, a partir del cual, la tasa de mejora se reduce por debajo de un valor umbral. La lógica detrás de este planteamiento es considerar que en la región en que una medida de eficiencia es efectiva en la reducción de la demanda, siempre resultará más apropiado desplegar esta medida de eficiencia que incrementar la capacidad de generación para cubrir esa demanda<sup>630</sup>.
- En el caso de los equipamientos, por lo general, hemos considerado que el despliegue de medidas de eficiencia seguirá una evolución tendencial desde las mejores aplicaciones actualmente disponibles en el mercado, y establecerá un nivel de eficiencia en el año 2050 que, o bien queda dentro de escenarios ya elaborados para la tecnología en cuestión, o bien se queda suficientemente por debajo de los límites de eficiencia teóricos de las soluciones tecnológicas actuales<sup>631</sup>.
- Sobre algunos componentes de algunos modos de edificios no hemos desarrollado estudios paramétricos para su optimización, por limitación del alcance del trabajo aquí

desarrollado, y hemos adoptado directamente la configuración de partida de los modelos BAU<sup>632</sup>, o los resultados procedentes de la optimización en otro modelo de edificio<sup>633</sup>. Este planteamiento también es bastante conservador en el sentido de que existe un potencial de mejora adicional respecto a lo que nosotros reflejamos en los resultados de este trabajo, que se puede desplegar mediante la optimización de las distintas variables que nosotros no hemos optimizado.

Y por lo que respecta al fondo filosófico del balance entre el despliegue de medidas de eficiencia y generación adicional, los puntos fundamentales en los que se apoya nuestro planteamiento son los siguientes:

- La situación a la que nos ha conducido nuestra evolución hasta la actualidad, con muy poco peso de las consideraciones de eficiencia, nos ha dejado como herencia un despliegue de infraestructuras energéticas, tanto para generación<sup>634</sup> como para transporte, que en la actualidad ya conllevan unos impactos importantes tanto a nivel económico como ambiental. Con la perspectiva de tener que acomodar hasta el año 2050 un crecimiento significativo de las demandas de servicios y, en aras a acotar el impacto de la infraestructura energética, parece un planteamiento adecuado el intentar mantenernos dentro del margen que nos proporciona el sobredimensionado actual de las infraestructuras energéticas, para acomodar el crecimiento de la demanda de servicios, empleando el despliegue de las medidas de eficiencia para cubrir nuestra demanda de servicios con una infraestructura del orden de la actual. Estas consideraciones adquieren todavía más peso en el contexto E3.0 en el que se plantea una gran electrificación del sistema energético, motivo por el cual al

**630** Más adelante volveremos sobre este aspecto.

**631** Hay que tener presente, que para el año 2050 pueden haber surgido otras tecnologías distintas a las actuales cuyos límites teóricos de eficiencia sean superiores, por lo que este planteamiento consideramos que es suficientemente conservador.

**632** Por ejemplo, en el caso de la distribución de superficies acristaladas.

**633** Como es el caso de los espesores de aislamiento para el contexto E3.0.

**634** Por lo que respecta a la generación, el planteamiento del contexto E3.0 es sustituir toda la infraestructura fósil o nuclear actual mediante fuentes de energía renovables, con un carácter mucho más distribuido, y una densidad de potencia menor de la propia central de generación (aunque en el caso de la mayoría de las renovables la central de generación incluye también la "minería" del recurso energético). Si bien el recurso renovable del que disponemos en nuestro país nos permite cubrir de cara al año 2050 incluso una demanda BAU, pero el requerimiento de infraestructuras de generación se dispararía.

crecimiento de la demanda de servicios se añadiría este cambio modal, para sobrecargar todavía más los requerimientos de infraestructuras eléctricas. En estas condiciones resulta prioritario el acotar la demanda de sectores como el de la edificación, que evoluciona en el contexto E3.0 hacia una electrificación total con el fin de contener el crecimiento de las infraestructuras eléctricas y su asociado impacto.

- A pesar de que el elevado potencial de recursos renovables con el que contamos (GP, 2050) nos permitiría cubrir de forma “holgada” incluso una demanda BAU para el año 2050, tal y como apuntábamos al principio de este informe esto no nos situaría en una senda de sostenibilidad, pues sería tan solo cuestión de tiempo el que una demanda creciente llegara a agotar los recursos renovables disponibles. En este sentido, el despliegue de la eficiencia para acotar el crecimiento de la demanda es una condición sine qua non para establecerse en una senda de desarrollo sostenible. Y dada la dimensión global que ha adoptado el modelo de crecimiento basado en el galopante incremento del consumo de energía, y el gran riesgo que corremos si las economías emergentes y países menos desarrollados adoptan el mismo patrón de evolución, se impone un planteamiento de contracción y convergencia que proporcionan alternativas de aplicación a nivel global en cortos plazos de tiempo, lo cual requiere un rápido despliegue de la eficiencia energética, que actuando como mecanismo de palanca permita modificar la senda de desarrollo global hacia la sostenibilidad<sup>635</sup>.

Y dentro del sector edificación, estos planteamientos de apurar el potencial de las medias de eficiencia caen completamente dentro de las iniciativas actuales que tanto en EE. UU.

como en Europa apuntan ya de forma decidida hacia los edificios de consumo neto cero para un plazo tan cercano como 2015-2020.

Pasamos a continuación a proporcionar una breve descripción de los principales elementos de eficiencia considerados en el desarrollo de los modelos de edificios de este estudio.

### 3.7.6.1 Envoltente edificio

La envoltente del edificio, como tercera piel de las personas que utilizamos el edificio, constituye un elemento de gran importancia sobre las prestaciones energéticas del edificio para cubrir la demanda de servicios de confort, y condiciona en gran medida sus demandas de climatización y de iluminación.

En este punto discutimos brevemente los elementos opacos y traslúcidos de la envoltente del edificio, para dar indicaciones en torno a las hipótesis realizadas sobre las mismas para configurar los contextos BAU y E3.0.

#### 3.7.6.1.1 Cerramientos opacos

Los cerramientos opacos del edificio condicionan fuertemente la demanda de calefacción<sup>636</sup> del edificio, y pueden afectar también de forma relevante a su demanda de refrigeración<sup>637</sup>. El nivel de aislamiento de estos componentes constituye uno de los elementos principales de la limitación de la demanda energética del edificio de forma pasiva. En el contexto E3.0, el requerimiento de minimizar en origen la demanda de energía del sector edificación para no sobrecargar los requerimientos de capacidad de generación y transporte de energía eléctrica, debido a la integración y electrificación del sistema energético, conduce a la exigencia de

<sup>635</sup> Y al igual que con el despliegue de la generación renovable, la responsabilidad del despliegue de la eficiencia energética recae sobre los países que a base de ineficiencia y elevado consumo de recursos fósiles se han situado en una situación ventajosa respecto al resto del planeta.

<sup>636</sup> Esta demanda está constituida fundamentalmente por las pérdidas de transferencia a través de la envoltente del edificio y por las necesidades de ventilación del espacio interior, aunque en algunos casos hay equipamientos, como los equipos de refrigeración de alimentos, que pueden afectar significativamente a esta demanda.

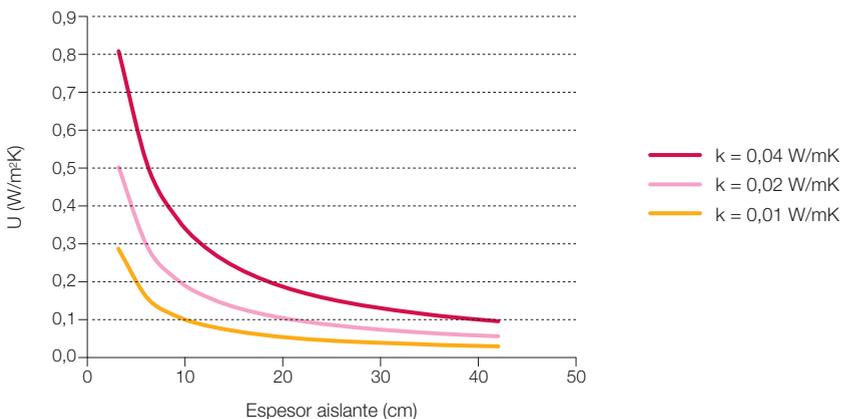
<sup>637</sup> Tanto por la restricción a las ganancias por transmisión debidas a diferencias de temperatura con el exterior, como por el impedimento a la disipación de las cargas internas en algunas tipologías de edificios.

apurar al máximo las posibilidades del aislamiento de los cerramientos opacos del edificio. Con este motivo, más adelante hemos procedido a optimizar los espesores de aislante para cada emplazamiento climático, de tal forma que los niveles de aislamiento en el contexto E3.0 difieren significativamente entre unos emplazamientos y otros, lo que conduce a una gran regularización espacial<sup>638</sup> de la demanda de energía, para climatizar los edificios dentro de la España peninsular.

El parámetro principal<sup>639</sup> que caracteriza el comportamiento térmico de la componente opaca es su coeficiente de transferencia U, cuyo valor viene fuertemente condicionado por la cantidad y características del aislante empleado. Como referencia de los valores del coeficiente U que puede tener sentido implementar, en el estándar Passiv Haus se emplean valores del orden de  $U = 0,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ , que como veremos más adelante tienen sentido en algunos emplazamientos climáticos de la España peninsular, pero resultan excesivos para otros emplazamientos.

Para visualizar los requerimientos asociados a alcanzar estos valores del coeficiente U, en la figura 302 mostramos la dependencia del coeficiente U con el espesor de aislante empleado para la configuración de muros del edificio de referencia empleado para describir la edificación residencial, para distintos valores de la conductividad térmica del aislante empleado. La conductividad  $k = 0,04 \text{ W/mK}$  representa un valor muy normal<sup>640</sup> entre los materiales aislantes empleados en la actualidad, por lo que resulta adecuado para visualizar los requerimientos de aislamiento en relación a los valores actualmente implementados en los edificios. Una conductividad  $k = 0,02 \text{ W/mK}$  se encuentra en el límite inferior de las conductividades de aislantes comercialmente disponibles en la actualidad. Con la aplicación de nanotecnología a los materiales de construcción, es posible evolucionar hacia valores todavía inferiores de la conductividad. De cualquier forma, dado que en la resistencia térmica de un aislante intervienen tanto su espesor como la conductividad, es posible alcanzar los niveles deseados de coeficiente U

**Figura 302.** Relación entre el coeficiente U y el espesor de aislante (para tres valores distintos de la conductividad térmica) en el muro del edificio de referencia de los edificios residenciales distintos a los de bloque de vivienda.



<sup>638</sup> Situación muy distinta a la que impulsa la regulación energética actual (CTE).

<sup>639</sup> Hay otros parámetros relevantes, como su reflectancia solar y la cantidad y distribución de inercia para la gestión local de la demanda energética.

<sup>640</sup> Más bien tirando a elevado.

incrementando los espesores de aislante según sea necesario para el valor de la conductividad del aislante elegido<sup>641</sup>. Como nos muestra esta figura, para alcanzar los niveles de aislamiento del estándar Passiv Haus con un material aislante de  $k = 0,04 \text{ W/mK}$  es preciso emplear espesores de aislante del orden de 35 cm, mientras que este espesor se reduce al orden de 20 cm al usar un material con  $k = 0,02 \text{ W/mK}$  y a 10 cm al emplear un material con  $k = 0,01 \text{ W/mK}$ , estando este último valor ya muy cercano a los espesores actualmente implementados.

### 3.7.6.1.2 Acristalamientos

Las superficies acristaladas constituyen un componente muy importante de los edificios. Además de permitir la comunicación visual entre el interior y el exterior del edificio, tienen repercusiones muy importantes desde el punto de vista energético:

- Constituyen el método más sencillo y de menor coste para aprovechamiento de la iluminación natural<sup>642</sup>.
- Por ellos se realizan los aportes solares pasivos directos, con efectos beneficiosos para cubrir la demanda de calefacción y negativos de cara a la demanda de refrigeración.
- Condicionan las características de transferencia con el en torno al modificar el coeficiente de transferencia de la envolvente<sup>643</sup>.

La superficie acristalada de un edificio debe buscar un equilibrio entre los anteriores factores, lo cual conduce a requerimientos contradictorios<sup>644</sup> que hasta la fecha no han podido ser resueltos por la propia superficie acristalada, requiriendo la participación de otros elementos de la envolvente<sup>645</sup> que en la medida

de lo posible cubran estas funciones. Esta imposibilidad actual de los acristalamientos para cubrir simultáneamente todos sus requerimientos conduce a la situación de que para cada tipología de edificio exista un valor óptimo de la superficie acristalada en el cual se obtiene el mejor balance entre beneficios e inconvenientes de este elemento. En la arquitectura moderna encontramos, sobre todo en el sector terciario, múltiples ejemplos de edificios en los que se supera ampliamente este valor óptimo, donde se requiere a posteriori el despliegue de elementos de protección solar adicionales y repercuten significativamente en el consumo energético del edificio.

Desde el inicio del uso de las superficies acristaladas en los edificios hasta la fecha se ha avanzado muchísimo en la tecnología, y existen en la actualidad una gran cantidad de productos optimizados cada uno de ellos con una finalidad distinta<sup>646</sup>. Los dos parámetros principales<sup>647</sup> que distinguen a un acristalamiento desde el punto de vista térmico son su coeficiente de transferencia ( $U$ )<sup>648</sup>, y su coeficiente de ganancia solar ( $SHGC$ )<sup>649</sup>, y ambos han experimentado y seguirán haciéndolo una gran mejora. Como ejemplo, en la figura 303 recogemos las proyecciones del US DOE para la evolución en los próximos años del coeficiente de transferencia de las ventanas<sup>650</sup>.

La mayor limitación actual de la tecnología de acristalamientos es precisamente la ausencia de inteligencia, lo cual les confiere la rigidez de verse atados a unos valores fijos de los coeficientes  $U$  y  $SHGC$ . Y este es precisamente el camino por el que cabe esperar que evolucionen más las superficies acristaladas desde su situación actual<sup>651</sup>. Ya existen en el mercado ventanas termocrómicas<sup>652</sup> y electrocrómicas<sup>653</sup> con capacidad de modificar dinámicamente alguna de sus propiedades en función de una señal exterior (irradiación solar)

**641** Si bien es cierto que para un valor dado del coeficiente  $U$  deseado, el uso de aislantes de conductividad elevada exige espesores de aislante que pueden resultar problemáticos desde el punto de vista de la ejecución constructiva, también es cierto que puede haber motivos para emplear un aislante que no tenga el valor más bajo posible de la conductividad térmica, como pueden ser la biocompatibilidad del material, su potencial de calentamiento global (GWP), o incluso su capacidad de actuar como sumidero de  $\text{CO}_2$  al reducir la tasa efectiva de retorno del carbono de la biomasa a la atmósfera.

**642** Para zonas interiores del edificio sin posibilidad de disponer de ventanas o lucernarios exteriores, sigue habiendo opciones tecnológicas (tubos de luz, fibra óptica) para transportar la iluminación natural al interior, pero siempre con una menor relación eficacia/coste.

**643** Habitualmente los acristalamientos tienen un coeficiente de transferencia más elevado que el asociado a la parte opaca de la envolvente.

**644** Permitir el aporte solar en temporada de calefacción y evitarlo en temporadas de refrigeración.

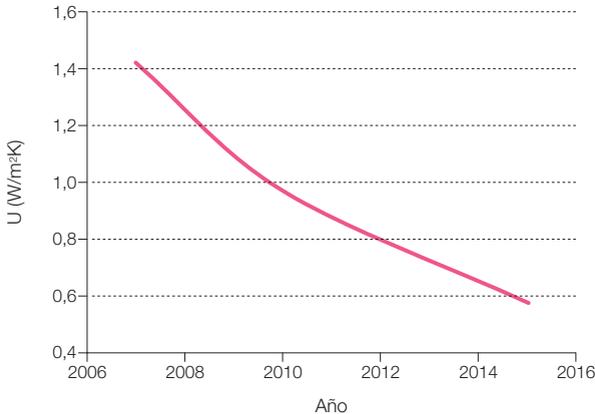
**645** Este es el caso de las protecciones solares pasivas, que como tales también deben buscar un compromiso entre sus efectos positivos y los negativos (la reducción de aporte solar en temporada de calefacción).

**646** Así, se dispone de ventanas aislantes configuradas con diversas capas de acristalamientos con recubrimientos de baja emisividad, y gases de baja conductividad en las cámaras interiores, así como de ventanas con recubrimientos de protección para evitar la entrada de la fracción no visible de la radiación solar (limitando así los aportes térmicos en temporada de refrigeración).

**647** Un tercer parámetro de relevancia es la transmisividad luminosa del acristalamiento, que condiciona su capacidad de contribuir a la iluminación natural de los espacios.

**648** En general podemos hablar de tres coeficientes  $U$  en una ventana: el del vidrio no perturbado por efectos de borde (centro del vidrio), el del marco, y el del conjunto del hueco, que además de ponderar los valores de vidrio y marco incorpora los efectos de borde (o puentes térmicos) asociados al encuentro entre

**Figura 303.** Proyección del DOE para el coeficiente de transferencia térmica de las ventanas, en el marco del programa Net-zero energy commercial building initiative<sup>654</sup>.



o del sistema de control del edificio, y su participación a mayor escala en el mercado no se encuentra tan alejada<sup>655</sup>. Este comportamiento dinámico debe extenderse también a la capacidad aislante del acristalamiento, para evitar la penalización que este elemento de la envolvente introduce actualmente sobre el desempeño energético del edificio en esas condiciones, en las que no realiza aportaciones positivas<sup>656</sup> y por el contrario penaliza debido a su mayor coeficiente de pérdidas.

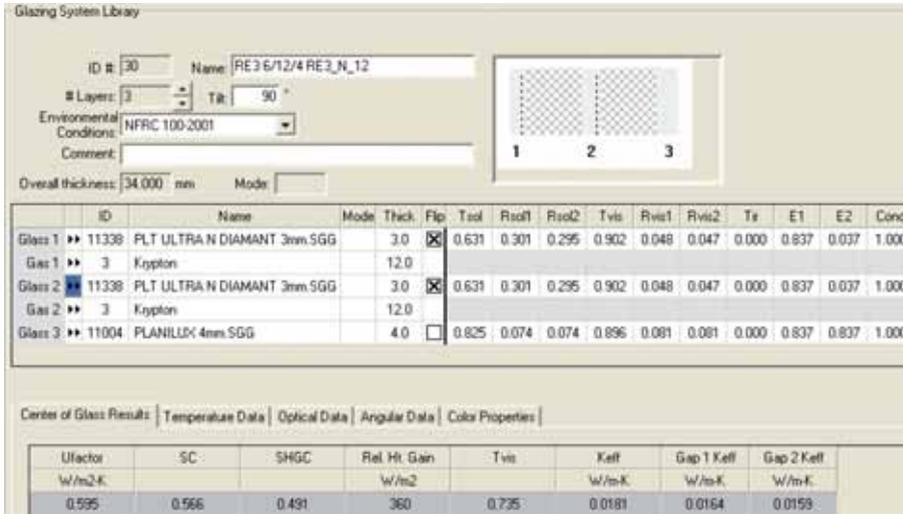
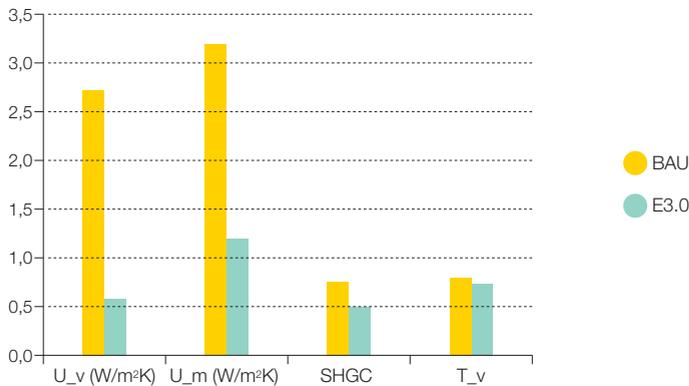
De cara al contexto E3.0, debido a la necesidad de su implementación en programas de simulación del edificio, hemos optado por configurar el acristalamiento de acuerdo con las capas actualmente disponibles de forma comercial<sup>657</sup>, aunque sin lugar a dudas para el año 2050 existirán nuevas capas con capacidad de obtener unas prestaciones globales de acristalamiento significativamente mejores a las que nosotros vamos a usar y con mayor simplicidad constructiva. El objetivo en el contexto E3.0, en el cual contamos con un despliegue de inteligencia que proporciona un control dinámico de las características del acristala-

miento, es obtener valores lo más bajos posibles del coeficiente U con los valores más elevados posibles del SHGC<sup>658</sup>.

La figura 304 recoge la composición por capas, y las prestaciones del acristalamiento implementado en el contexto E3.0. Como podemos ver, se trata de un acristalamiento triple con un valor de  $U_v = 0,595 \text{ W/m}^2\text{K}$  del orden de magnitud del previsto para el conjunto del hueco por el programa Net-Zero Energy Commercial Building Initiative (Iniciativa de edificios comerciales con un consumo de energía cero neto) del DOE para el año 2015, y con un SHGC = 0,49 peor del SHGC = 0,53 que pronostica este programa de desarrollo de cara al año 2015. En estas condiciones, el valor del coeficiente U del conjunto del hueco<sup>659</sup> en el contexto E3.0 se sitúa en  $U = 0,82 \text{ W/m}^2\text{K}$ , que resulta superior al valor de  $U = 0,8 \text{ W/m}^2\text{K}$  que usa ya en la actualidad el estándar Passiv Haus. Por estos motivos podemos afirmar que el acristalamiento considerado para el contexto E3.0 representa una aproximación muy conservadora del potencial que podríamos esperar para el año 2050 en este componente.

vidrio y marco. Mientras no indiquemos lo contrario, el valor del U que mostraremos es el del conjunto del hueco.

- 649** SHGC: Solar heat gain coefficient. También denominado coeficiente "g".
- 650** Los valores representados en esta figura recogen la mejor tecnología disponible. A modo de referencia, en la actualidad, y a pesar de la dispersión entre distintos productos, el orden de magnitud de los coeficientes U para acristalamientos típicos disponibles en el mercado (sin ser la mejor tecnología disponible) son de  $U_v = 5,5 \text{ W/m}^2\text{K}$  para un acristalamiento sencillo,  $U_v = 3 \text{ W/m}^2\text{K}$  para un acristalamiento doble, y  $U_v = 1,6 \text{ W/m}^2\text{K}$  para un acristalamiento doble con recubrimiento bajo emisivo.
- 651** Como comentábamos más arriba, elementos pasivos tradicionales como los voladizos u otras protecciones solares pueden desempeñar también parte de estas funciones de complemento para modificar estacionalmente los coeficientes efectivos del hueco, pero por lo general conllevan un compromiso entre sus efectos positivos y efectos negativos colaterales. Sin embargo, estos elementos pasivos tradicionales deben jugar un papel importante en el proceso de transición hacia el contexto E3.0.
- 652** Los cristales termocrómicos modifican su SHGC en función de la radiación solar que incide sobre ellas.
- 653** Los cristales electrocrómicos modifican sus características (fundamentalmente su SHGC) en función de una señal eléctrica.
- 654** El objetivo de este programa es alcanzar edificios comerciales cero neto viables económicamente para el año 2025 (ZEB), y residenciales en 2020 (ZEH). La definición que emplean de edificios de consumo cero neto es la de edificios que generan tanta energía como consumen, combinando medidas eficiencia con capacidad generación local de acuerdo con tecnologías renovables.
- 655** En el programa Net-Zero Energy Commercial Building Initiative del US DOE anteriormente comentado, cuentan con que para el año 2015 el control dinámico de las ventanas ya permitirá variar la transmitancia luminosa entre el 65% y el 2% y el SHGC entre 0,53 y 0,09.
- 656** Por ejemplo cuando no hay sol para realizar aportes pasivos a la cobertura de la demanda de calefacción o a los requerimientos de iluminación.

Figura 304. Capas y características del acristalamiento empleado para el contexto E3.0<sup>660</sup>.Figura 305. Comparativa entre las características de los elementos del hueco en los contextos BAU y E3.0 ( $U_v$  = coeficiente U del vidrio;  $U_m$  = coeficiente U del marco;  $T_v$  = transmisividad de la radiación visible).

Adicionalmente al acristalamiento, los huecos del edificio cuentan con un marco para integrar ese acristalamiento, y a menudo con una serie de puentes térmicos asociados a la inserción del hueco en el resto de la envolvente y a la unión marco-vidrio. También para el caso del marco

hemos introducido una mejora de cara al contexto E3.0. En la figura 305 presentamos una comparación de las principales características del hueco en el contexto E3.0 y lo que podría ser una tecnología representativa del contexto BAU<sup>661</sup> para el conjunto del parque de edificios.

**657** Lo cual constituye un enfoque conservador, pues conduce a unas prestaciones del acristalamiento peores a las que cabría esperar con el tendencial de desarrollo de esta tecnología. En parte compensamos esto considerando un acristalamiento triple, pero como veremos, a pesar de ellos las prestaciones resultantes del acristalamiento son peores de las que se proyectan ya de cara al año 2015.

**658** En efecto, al disponer de elementos dinámicos con capacidad de proporcionar protección solar en los momentos en que sea necesario, el estado no perturbado del acristalamiento debe tener elevados valores del SHGC para maximizar su capacidad de aporte solar para cubrir la demanda de calefacción y no perjudicar su transmisividad luminosa para contribuir a la iluminación natural.

**659** Ponderación de los valores de vidrio y marco e incluyendo los puentes térmicos de unión vidrio-marco y pared-marco.

**660** Generado con el programa WINDOW del LBNL.

**661** Realmente, para la mayoría de los modelos de edificios empleados, el BAU es ligeramente distinto a este acristalamiento y marco que presentamos aquí (viene definidos por std 90.1-2004). Pero básicamente lo que define la tecnología del hueco en el caso BAU es un acristalamiento doble con aire en la cámara interior, y un marco metálico con rotura de puente térmico.

Por último, la característica diferencial del contexto E3.0 frente al contexto BAU es el dotar de inteligencia a los huecos del edificio, con capacidad de alterar sus coeficientes U y SHGC de forma dinámica según las necesidades de climatización de los espacios interiores del edificio.

### 3.7.6.2 Iluminación

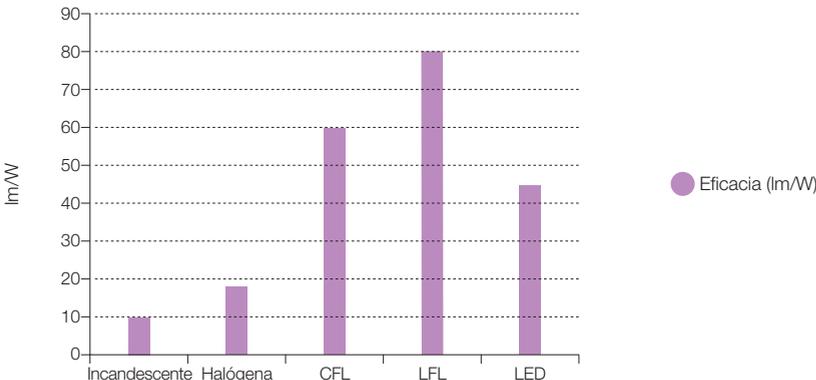
La iluminación de los espacios interiores de los edificios constituye un elemento importante de la demanda de energía de este sector, que actualmente incluso puede dominar la estructura de la demanda energética del edificio en situaciones donde se requieran elevadas iluminancias de los espacios durante periodos de tiempo muy prolongados.

A lo largo del tiempo hemos visto evolucionar de forma significativa la eficacia de las tecnologías empleadas para cubrir la demanda de iluminación<sup>662</sup>, pero también hemos visto

crecer la demanda de iluminación. Afortunadamente todavía disponemos de un importante margen de mejora de las eficacias luminosas de las lámparas y de los rendimientos de las luminarias empleadas, a lo que se debe unir la introducción de la iluminación natural<sup>663</sup> y de los elementos de inteligencia<sup>664</sup> para reducir de forma muy importante el consumo de energía asociado a la iluminación.

Las eficacias luminosas de las lámparas que actualmente encontramos en el mercado son todavía bastante bajas respecto al potencial tecnológico. En la figura 306 recopilamos valores medios de las eficacias luminosas de un muestreo realizado en enero de 2010. En ella podemos observar cómo los tubos fluorescentes proporcionan actualmente los mejores niveles de eficacia<sup>665</sup>, mientras que las lámparas LED<sup>666</sup>, se encuentran significativamente por debajo. Sin embargo, ya existen algunos productos de tecnología LED en el mercado que alcanzan niveles de eficacia comparables a los de los tubos fluorescentes, y su potencial

**Figura 306.** Valores medios de la eficacias luminosas de lámparas comercialmente disponibles en un muestreo del mercado realizado el 1/2010. (CFL: lámpara fluorescente compacta; LFL: lámpara fluorescente lineal; LED: diodo emisor de luz).



<sup>662</sup> Por ejemplo, en EE. UU., antes de la crisis energética del 1974, era habitual diseñar los edificios de oficinas con potencias de iluminación superior a 50 W/m<sup>2</sup>, mientras que actualmente un buen diseño puede estar por debajo de los 10 W/m<sup>2</sup>.

<sup>663</sup> Tanto desde las ventanas y lucernarios, como mediante los tubos de luz y la fibra óptica que permiten llevar la iluminación natural hasta espacios interiores de los edificios.

<sup>664</sup> Entre los que se encuentra la diferenciación espacial y ajuste de las iluminancias según requerimientos reales e instantáneos de la demanda de iluminación.

<sup>665</sup> Pudiendo llegar a superar los 110 lm/W en los productos más eficientes.

<sup>666</sup> De las que a menudo no se proporciona información de eficacia luminica.

tecnológico de mejora en los próximos años puede llevar a alcanzar eficacias del orden de los 230 lm/W.

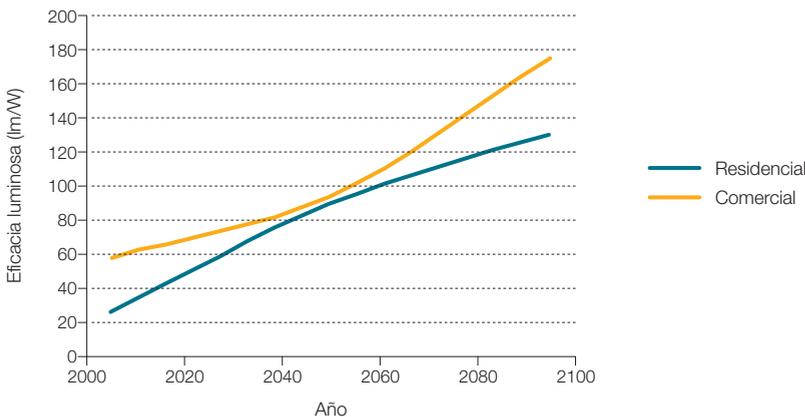
En (F. Rong, L. Clarke, S. Smith, 2007) encontramos un escenario de evolución de las eficacias luminosas del mix de tecnologías de iluminación empleado en edificios residenciales y comerciales. La figura 307 recoge este escenario. Si bien, como puede observarse, la mejora respecto a la situación actual es muy importante, pero la tendencia de mejora es prácticamente monótona<sup>667</sup> a lo largo de todo este siglo, e indica la ausencia de mecanismos de aceleración de la introducción de medidas de eficiencia, por lo que este escenario parece poco compatible con la urgencia de intentar estabilizar el sistema climático, y la necesidad de acotar la demanda energética global. De hecho, resulta indicativo que en estos escenarios para el año 2100 se sigue suponiendo una cierta participación de las lámparas incandescentes en el mix de lámparas implementadas en ese año.

De hecho, las proyecciones del DOE<sup>668</sup> para la evolución de la tecnología LED en los próximos años conducen a la disponibilidad de niveles muy superiores de eficacia luminosa en plazos mucho más cortos de tiempo, tal y como muestra la figura 308, con un límite de prestaciones de la tecnología LED de 230 lm/W que según esta referencia se podría alcanzar para el año 2018.

De hecho, en la literatura asociada al programa ZEB de edificios comerciales que impulsa el DOE manejan valores de eficacia luminosa del orden de 200 lm/W para el año 2025 (B. Griffith, P. Torcellini, N. Long, D. Crawley, J. Ryan, 2006).

Las implicaciones energéticas de acelerar el despliegue de las medidas de eficiencia para la iluminación de los espacios interiores de los edificios resultan evidentes en el contexto de la tendencia creciente de la demanda de servicios de iluminación con el PIB. En la figura 309 reproducimos esta tendencia según ([R]E, 2008) para el caso de los

**Figura 307.** Evolución de la eficacia luminosa promedio del mix de tecnologías empleado para edificios residenciales y comerciales según (F. Rong, L. Clarke, S. Smith, 2007).



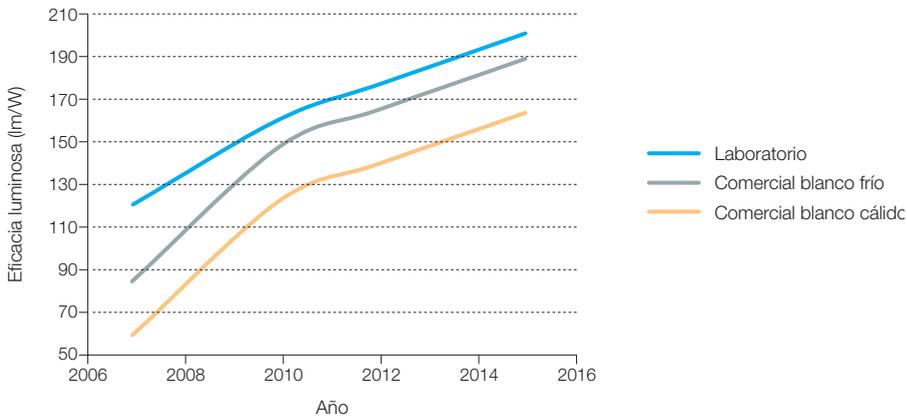
<sup>667</sup> Incluso con mejores tasas de mejora hacia el final del período considerado en el caso de los edificios comerciales.

<sup>668</sup> DOE: Departamento de Energía de Estados Unidos. Proyecciones del: NGLIA LED Technical Committee and the Department of Energy, Fall 2007.

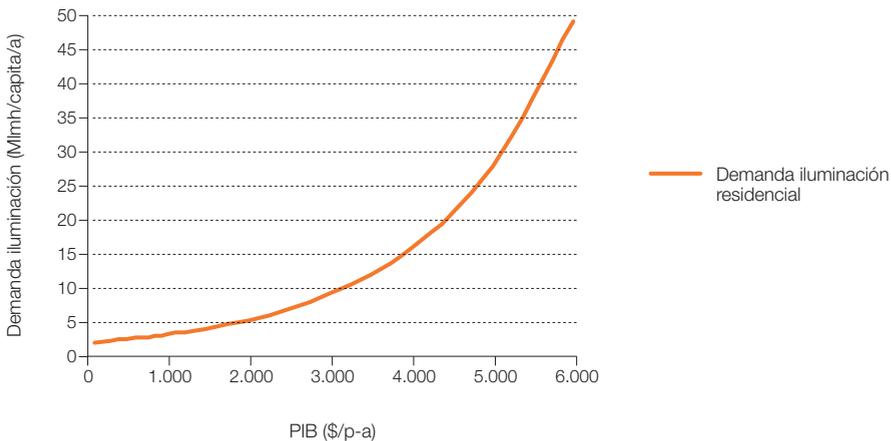
edificios residenciales. En la figura 310 mostramos el impacto energético<sup>669</sup> asociado a cubrir esta demanda de iluminación a medida que se van introduciendo distintas medidas de eficiencia.

La figura 311 agrupa la información de distintas referencias relativa a la disponibilidad comercial de tecnología eficiente de iluminación, mostrando la evolución que cabe esperar de la eficacia luminosa de las lámparas

**Figura 308.** Escenario de evolución de la eficacia luminosa de las lámparas LED según el DOE.

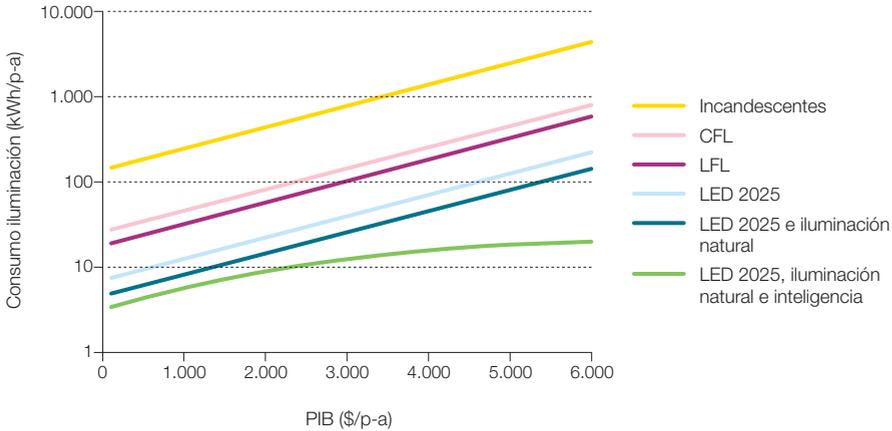


**Figura 309.** Tendencia del incremento de la demanda de servicios de iluminación con el PIB ([R]E, 2008).

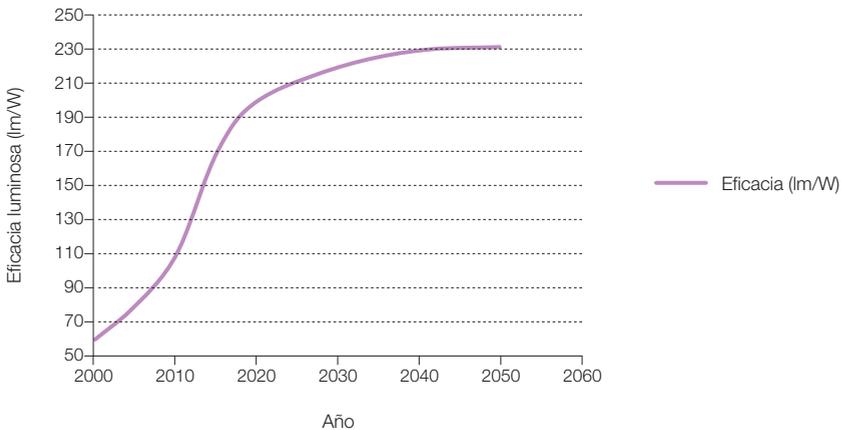


<sup>669</sup> Adicionalmente al consumo directo para las lámparas, las medidas de eficiencia introducidas en la iluminación de los edificios conducen a una reducción de la demanda de aire acondicionado en los edificios, que especialmente para el sector no residencial puede suponer una importante componente de la demanda, al mismo tiempo que puede incrementar la demanda de calefacción. Estos efectos de interacción entre medidas de eficiencia quedarán recogidos al elaborar los escenarios de demanda energética de los edificios mediante simulación dinámica.

**Figura 310.** Impacto sobre el consumo de energía asociado a satisfacer la demanda de servicios de iluminación al introducir distintas medidas de eficiencia (IRJE, 2008).



**Figura 311.** Disponibilidad comercial de tecnologías eficientes de iluminación.



si se incentiva la penetración en el mercado de las mejores tecnologías disponibles.

luminosas a valores máximos del orden de 110 lm/W.

Según estos resultados, para el escenario E3.0 consideraremos eficacias luminosas que irán de 180 lm/W hasta 220 lm/W según el tipo de espacios considerados, mientras que en el contexto BAU limitaremos las eficacias

En el contexto E3.0 se realizará un extensivo uso de la iluminación natural, tanto en zonas perimetrales con los elementos de acristalamiento del edificio, como en los espacios interiores mediante los tubos de luz

y la tecnología de fibra óptica. Adicionalmente, en el contexto E3.0 se incorporarán elementos de inteligencia en los sistemas de iluminación para ajustar el consumo de energía a la cobertura de la demanda real de servicios lumínicos (controles ocupación, adaptación espacio-temporal de la iluminación a las necesidades reales, etc.).

### 3.7.6.3 Equipamientos

Por equipamientos nos referimos a los consumos de proceso asociados a la operación de los edificios, que incorporan, por lo general, todos los electrodomésticos, ordenadores y otras cargas eléctricas, así como los equipamientos que consumen combustibles (como las cocinas), y otros equipos consumidores de energía asociados al desarrollo de la actividad del edificio considerado.

Los equipamientos de los edificios ya constituyen hoy en día un componente importante del consumo, que incluso llega a ser la dominante en algunas tipologías de edificios. Pero de cara al futuro, a medida que se vayan incorporando medidas de eficiencia en aquellos componentes de consumo del edificio sobre los que regulamos límites máximos de consumo, y a medida que vaya creciendo el requerimiento de incorporar equipamientos diversos en ciertas tipologías de edificios como los residenciales, los equipamientos irán ganando peso relativo en la estructura de consumo energético de los edificios, hasta llegar a convertirse en componentes dominantes en contextos eficientes como el E3.0 en muchas tipologías de edificios.

A pesar de esta importancia actual y con tendencia creciente de los equipamientos, en la mayoría de las ocasiones su consumo energético no se recoge dentro de la regulación

energética de los edificios ni de los indicadores empleados para describir las prestaciones energéticas del edificio. De hecho, llegamos a diferenciar entre consumo regulado y no regulado. El consumo regulado por lo general comprende el consumo de climatización y de producción de ACS, y en algunos casos<sup>670</sup> el consumo asociado a la iluminación. Puesto que el consumo regulado está sometido a restricciones más o menos directas por parte de la regulación correspondiente, la tendencia es a que vaya reduciéndose con el tiempo. Por el contrario, la componente no regulada tendrá una tendencia a evolucionar más lentamente hacia la eficiencia, a lo cual debe añadirse la tendencia a incorporar más equipamientos en los edificios.

Incluso el estándar Passiv Haus, que sí que impone un límite al consumo de energía total del edificio, es mucho más generoso en ese límite (120 kWh/m<sup>2</sup>-a en términos de energía primaria) que en el límite que imponen sobre la demanda de calefacción (15 kWh/m<sup>2</sup>-a) que constituye la principal componente regulada en los países<sup>671</sup> donde se originó este estándar.

Pero al evolucionar hacia edificios de bajo consumo (VLEB) o incluso consumo nulo (ZEB), la importancia de las componentes no reguladas se hace patente, de tal forma que es de esperar que se vaya imponiendo poco a poco el consumo de energía total del edificio como indicador de su desempeño energético.

Hasta hace relativamente poco, las consideraciones de eficiencia no figuraban entre los principales criterios de diseño de la mayoría de equipamientos, y en la actualidad sigue siendo así para algunos equipamientos, mientras que en otros estamos asistiendo a una rápida evolución de sus niveles de eficiencia. Por tanto, en conjunto

<sup>670</sup> A menudo, el consumo de iluminación se deja fuera de la componente regulada en los edificios residenciales.

<sup>671</sup> Alemania y Suecia.

podemos decir que existe un importante potencial de mejora en el consumo energético de los equipamientos, que se materializará tanto por una reducción de las potencias nominales para desarrollar una cierta función, como por la aplicación de controles inteligentes que permitan que el consumo del equipamiento se ajuste a las necesidades reales en cada momento, eliminando los consumos de *stand-by* y otras componentes parásitas. En la web del etiquetado Energy Star<sup>672</sup> del DOE de los EE. UU. aparecen referenciados los requerimientos de eficiencia por encima del estándar federal, o de los equipos disponibles en el mercado que no cualifican para el etiquetado Energy Star, de distintos tipos de equipamientos, mostrando niveles de ahorro que van desde un 20% a un 90% según al equipo de referencia que sustituyan.

De cara al contexto E3.0 hemos incorporado unos niveles de ahorro potencial en los equipamientos eléctricos más comunes, que en términos de la potencia instalada representan reducciones del 50% al 75% según el tipo de edificio y de uso considerado<sup>673</sup>.

Por lo que respecta a los equipamientos de cocina, que en el BAU operan de acuerdo con el consumo de gas natural, para el contexto E3.0 hemos considerado su electrificación, lo que permite alcanzar niveles de reducción de potencia instalada en el aparato del orden del 50%<sup>674</sup>, a lo que se añade la aplicación de controles inteligentes.

Por lo que se refiere a los equipamientos más específicos de proceso, y en particular para aquellos con condiciones críticas de uso, como es el caso de los hospitales, los niveles de ahorro considerados han sido más conservadores, y se sitúan en torno a un 30%-40% según el tipo de equipamiento<sup>675</sup>.

Estas estimaciones de potencial de ahorro de los equipamientos introducidas en este estudio hay que considerarlas como una primera aproximación dentro del alcance de este estudio, pero quedan lejos de una cuantificación más precisa del potencial de ahorro que existe en esta componente de consumo energético de los edificios. Dado el dominio que adquiere esta componente en la estructura de consumo en el contexto E3.0 para muchas tipologías de edificios, consideramos que sería muy interesante profundizar en los potenciales técnicos de incremento de eficiencia de las distintas tipologías de equipamientos, así como incorporar esta componente de consumo dentro de la cesta de los consumos regulados para añadir un mayor incentivo de mercado a la progresión de los niveles de eficiencia en estos elementos.

### 3.7.6.4 Generación de calor y frío: Bombas de calor

#### 3.7.6.4.1 Generalidades

Uno de los elementos tecnológicos que caracteriza el sector edificación en el contexto E3.0 es la completa electrificación de la cobertura de la demanda térmica (calor, frío y ACS<sup>676</sup>). La producción de frío para climatización, tanto en la actualidad como en el contexto BAU, también se realiza con electricidad mediante el empleo de bombas de calor, al igual que la refrigeración para conservación de alimentos. Pero la producción de calor, para calefactar los edificios y para producir ACS, se encuentra dominada tanto en la actualidad como en el contexto BAU por procesos de combustión. En efecto, las calderas, mayoritariamente de combustibles fósiles, constituyen la tecnología dominante para generar calor en el sector edificación.

<sup>672</sup> <http://www.energystar.gov>.

<sup>673</sup> Debemos resaltar que estas mejoras de eficiencia, aun quedando bien por dentro del margen de mejora disponible, son ya bastante importantes, y para su despliegue se requerirá prestar una mayor atención regulatoria a la introducción de eficiencia en estos equipos.

<sup>674</sup> En términos de reducción del consumo, algunos modelos de cocinas de inducción actuales ya proporcionan mayores niveles de ahorro respecto a las cocinas de gas.

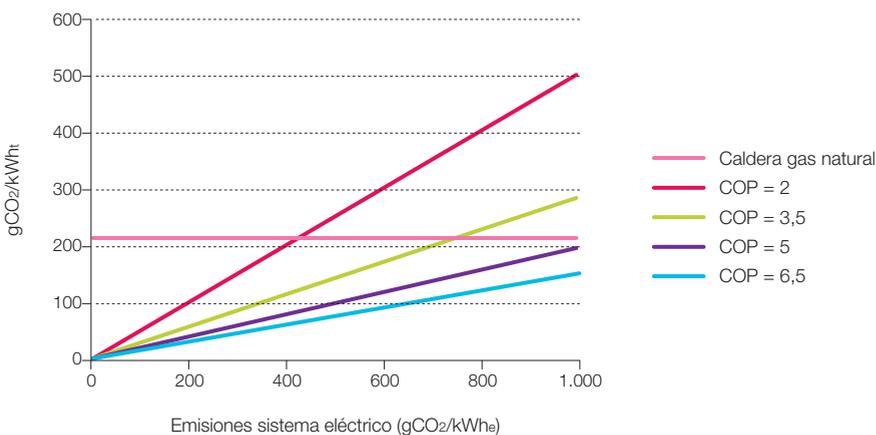
<sup>675</sup> Dada la limitada accesibilidad a la información técnica de estos equipos, hemos optado por asumir una mejora más conservadora. Sería necesario desarrollar un estudio más específico que escapa al alcance de este proyecto para cuantificar con más precisión el potencial de ahorro de estos equipamientos.

<sup>676</sup> ACS: Agua caliente sanitaria.

La electrificación de la demanda térmica de los edificios, en el contexto E3.0, viene, por un lado, asociada al proceso de integración del sistema energético y al potencial de emplear energía eléctrica residual, procedente de la regulación de un sistema de generación eléctrica basado en las energías renovables, así como por un planteamiento de optimización de las infraestructuras de distribución energética, una vez que la demanda de climatización deja de ser la componente dominante en la estructura energética de los edificios, mientras que las componentes dominantes operan basándose en la electricidad. Pero por otro lado, la evolución de la tecnología de bombas de calor también proporciona una mayor eficiencia a la solución eléctrica que a la de combustión, lo que permite reducir la cantidad de recursos energéticos requeridos para cubrir estas demandas y las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas. En efecto, la figura 312 nos muestra las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas a la producción de energía térmica, tanto para el caso de emplear una

caldera de gas natural de elevado rendimiento<sup>677</sup>, como para el caso de emplear bombas de calor con distintos COP<sup>678</sup>, como función del coeficiente de emisiones del sistema eléctrico. Como podemos observar, a medida que se reduce el coeficiente de emisiones de CO<sub>2</sub> del sistema eléctrico, las bombas de calor van mejorando sus prestaciones en términos de CO<sub>2</sub>, de tal forma que a partir de un cierto valor del coeficiente de emisiones del sistema eléctrico, tanto más elevado cuanto mayor sea el COP de la bomba de calor, la bomba de calor pasa tener unas prestaciones ambientales superiores a las de la caldera de gas natural. En el año 2008 el coeficiente de emisiones del sistema eléctrico español era de 390 g CO<sub>2</sub>/kWh<sub>e</sub> (CNE), y en el año 2009 ya se situó en 270 g CO<sub>2</sub>/kWh<sub>e</sub> (CNE), por lo que incluso una bomba de calor relativamente ineficiente<sup>679</sup> con un COP = 2, ya desde el año 2008 resultaba más ventajosa que una caldera de gas natural. Como veremos a lo largo de este punto, el potencial de mejora de la eficiencia de las bombas

**Figura 312.** Evolución de las emisiones específicas por unidad de energía térmica útil proporcionada de las calderas de gas natural y de bombas de calor con distinto COP, en función del coeficiente de emisiones del sistema eléctrico.



<sup>677</sup> 95% de rendimiento medio estacional.

<sup>678</sup> COP (Coefficient Of Performance) es el parámetro empleado para caracterizar la eficiencia de una bomba de calor, y se define como el cociente entre la potencia calorífica útil que proporciona, y la potencia eléctrica que consume.

<sup>679</sup> Un COP = 2, si fuera en condiciones nominales de diseño, correspondería a una calificación energética clase-G (la peor de toda la escala) según el RD 142/2003 que regula la calificación energética de estos equipamientos. La clase-A se alcanza con COP > 3,6. De cara a los valores presentados en esta figura, el COP es el valor estacional medio, pero ya hay equipos de bomba de calor disponibles en el mercado, que mediante el empleo de las tecnologías de flujo de refrigerante variable y de la recuperación interzonal, permiten incrementar significativamente el COP en condiciones de carga parcial respecto al COP de diseño.

de calor es muy elevado, de tal forma que en un contexto E3.0 podríamos alcanzar valores superiores a COP = 6,5, lo que conduciría a una gran reducción de las emisiones asociadas a la generación de energía térmica incluso con un sistema eléctrico como el actual.

En un contexto E3.0, el coeficiente de emisiones del sistema eléctrico es cero<sup>680</sup> (generación basándose en energías renovables), por lo que la bomba de calor alcanza su máxima ventaja respecto a las tecnologías de combustión para la generación de energía térmica<sup>681</sup>.

La mayoría de la energía térmica útil proporcionada por una bomba de calor procede de la energía térmica contenida en el ambiente, que actúa como foco frío o caliente, por lo que la electricidad consumida por la bomba constituye una pequeña fracción<sup>682</sup> de este aporte térmico. Este es el motivo de que el parámetro de eficacia que se emplea para caracterizar el comportamiento de la bomba de calor (COP) tenga un valor superior al 100%.

Las bombas de calor trasvasan (bombean) calor desde un foco frío a un foco caliente, mediante la modificación del nivel de presión de un fluido de trabajo interno que evoluciona de forma cíclica experimentando distintos procesos termodinámicos<sup>683</sup>. Según aprovechemos la transferencia de calor en el foco frío o caliente, la bomba de calor funciona proporcionando frío o calor. También es posible operar la bomba de calor en modo recuperativo para proporcionar simultáneamente frío y calor útiles, con lo que su COP se incrementa de forma muy importante. Este modo de trabajo puede emplearse, por ejemplo, para producir ACS simultáneamente a refrigeración, o para cubrir demandas simultáneas de frío y calor en algunas tipologías de edificio, o bien

mediante acumulación térmica cubrir demandas de frío y calor no simultáneas.

Respecto a los fluidos de trabajo empleados por las bombas de calor, en el origen de esta tecnología eran fluidos naturales<sup>684</sup>. Posteriormente<sup>685</sup>, surgieron los CFC, que resultaron fluidos de trabajo muy apropiados para la implementación de los ciclos de trabajo de estos equipos, para permitir la diseminación de sus aplicaciones tecnológicas (especialmente refrigeración y aire acondicionado). Recientemente, los CFC se han eliminado por su impacto en el agujero de la capa de ozono, y fueron sustituidos en primera instancia por los HCFC ahora también en proceso de eliminación, y más recientemente por los HFC, para los que también debería plantearse un proceso de eliminación por su impacto como GEI<sup>686</sup>. Actualmente estamos asistiendo al retorno de los fluidos refrigerantes naturales, como el isobutano para los refrigeradores, y el propio CO<sub>2</sub> para bombas de calor avanzadas<sup>687</sup>. En el contexto E3.0, el despliegue de la tecnología de las bombas de calor lo entendemos apoyado en el uso de estos refrigerantes naturales.

Por lo que respecta a la eficacia de las bombas de calor es preciso tener presente que sus prestaciones se ven fuertemente afectadas por los niveles térmicos de los focos frío y caliente. Esto justifica los distintos valores de COP y los potenciales de mejora que encontramos en distintas aplicaciones (producción de frío, calefacción, refrigeración de alimentos, producción de ACS, etc.). De igual forma, esta característica de las bombas de calor recomienda, en los sistemas de climatización, modificar las tecnologías de distribución de la energía térmica para favorecer las condiciones de trabajo del equipo de generación, y pasar de los emisores convencionales basados en procesos de transferencia

**680** Esta afirmación es rotunda en el caso de que la biomasa tenga una pequeña participación en el sistema de generación eléctrica, de tal forma que no se quemé biomasa que podría haberse empleado con otra finalidad, que proporcione una mayor eficacia en la fijación de CO<sub>2</sub> atmosférico (como la elaboración de elementos estructurales para la edificación, muebles, o aislamientos térmicos). En el caso de que la biomasa se empleara de forma más extensa en el sistema de generación eléctrica, para mantener esta neutralidad sería preciso que el recurso de biomasa empleado quedara directamente vinculado a plantaciones adicionales a todos los otros usos de mayor eficacia de fijación de CO<sub>2</sub>.

**681** En estas condiciones, desde el punto de vista de las emisiones de CO<sub>2</sub> el COP de la bomba de calor es irrelevante, pero no lo es desde el punto de vista de la energía necesaria que condiciona los recursos a emplear para configurar el sistema 100% renovable.

**682** De hecho esta fracción es 1/COP.

**683** En concreto, los cuatro procesos fundamentales que experimenta el fluido de trabajo de las bombas de calor son los de compresión, condensación, expansión y evaporación.

**684** Como el amoníaco.

**685** En torno a 1930.

**686** GEI: Gases de efecto invernadero.

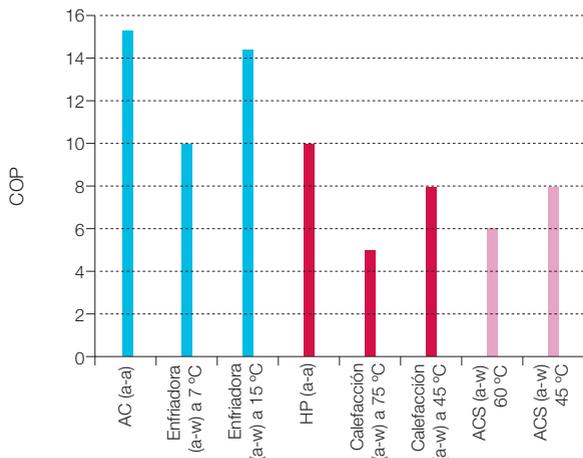
**687** Bombas de calor como las de la línea EcoCute que se ha introducido en Japón con COP superiores a los de las otras máquinas del mercado, y con capacidad de trabajar a temperaturas más elevadas con rendimiento aceptable, abriendo las puertas a la tecnología de bombas de calor para las aplicaciones de generación de ACS o de calor industrial.

dominantemente convectivos, que demandan temperaturas bajas para distribución de frío (6-7 °C) y temperaturas elevadas para distribución de calor (75-80 °C), a emisores básicamente radiactivos que puedan trabajar con temperaturas menos extremas (15-18 °C para frío y 35-40 °C para calor), lo cual proporciona otras ventajas desde el punto de vista del confort alcanzable en el interior de los edificios<sup>688</sup>. En otras aplicaciones, como la refrigeración de alimentos, hay menos margen para la modificación de estas temperaturas de trabajo. Por el lado de la disipación de energía en el modo de generación de frío, la implementación de condensadores evaporativos permite reducir la temperatura del foco caliente a costa de consumir

agua. El empleo de una torre de refrigeración, o el uso de una masa de agua o una masa de tierra con condiciones térmicas más favorables<sup>689</sup> que el aire ambiente, también conducen a una mejora del COP, pero a menudo los consumos parásitos adicionales para explotar esta otra fuente térmica más favorable, no se incluyen en el COP, y conducen a la situación en que no es posible comparar directamente los COP de distintas aplicaciones.

A modo de ejemplo, en la figura 313 recogemos los COP límites que se pueden obtener para distintas aplicaciones de bomba de calor, bajo las condiciones indicadas al pie de la figura<sup>690</sup>. Como podemos observar, eligiendo

**Figura 313.** Valores límite del COP de bombas de calor en distintas aplicaciones sin procesos recuperativos. AC = acondicionador de aire (bomba de calor trabajando en modo frío); HP = bomba de calor en modo calefacción; a-a = bomba de calor aire-aire (trabaja entre el aire ambiente y el aire dentro del edificio); a-w = bomba de calor aire-agua (trabaja entre el aire ambiente y un circuito de agua para distribución de la energía térmica dentro del edificio); decremento de temperatura del aire de impulsión en modo refrigeración = 10 °C; incremento de temperatura del aire de impulsión en modo calefacción = 15 °C; Temperatura ambiente de condensación en modo frío = 35 °C; Temperatura ambiente en modo calor = 5 °C.



**688** Como ejemplo, trabajando en modo calor, una bomba de calor aire-agua (es decir, que coge energía térmica del aire ambiente y la transfiere a un circuito de agua a mayor temperatura) puede suministrar agua caliente a 75-80 °C a un circuito de lo que comúnmente se denominan radiadores (pero que realmente son convectores, pues la mayor parte de transferencia térmica al espacio que climatizan se produce por convección al flujo de aire que se origina por la activación térmica que supone la presencia de ese elemento a temperaturas relativamente elevadas), que es el sistema de distribución de calor más común en el parque de edificios residenciales actual. En estas condiciones de trabajo, la bomba de calor debe "bombear" la energía térmica del ambiente a unos 5 °C hasta los 80 °C del circuito de agua de los "radiadores", lo cual implica un salto térmico elevado y conduce a valores relativamente bajos del COP (es decir, el "bombeo" de un "desnivel" térmico tan grande consume mucha electricidad). Pero esa misma bomba de calor también puede usarse para suministrar agua caliente a 35-40 °C a un sistema de distribución del calor por radiación, como los suelos o muros radiantes (que realmente distribuyen la energía por radiación, pues debido a su menor nivel térmico no activan el movimiento del aire en el espacio, por lo que la transferencia convectiva es muy inferior a la radiativa). En estas condiciones, la bomba de calor debe "bombear" la energía térmica del ambiente a unos 5 °C hasta los 40 °C del circuito de distribución radiante, es decir, un "desnivel" térmico muy inferior, lo cual conduce a un COP mucho más elevado y a un consumo de electricidad muy inferior para cubrir esa demanda de calefacción. Los denominados sistemas de hilo radiante, también distribuyen la energía de forma radiante, pero a diferencia de los suelos, muros o incluso techos radiantes con distribución mediante agua no pueden acceder al incremento de eficiencia que proporciona una bomba de calor, pues constituyen un efecto resistivo puro (efecto Joule). Por este motivo los hilos radiantes no los consideramos en el contexto E3.0.

**689** Como en las aplicaciones geotérmicas.

**690** Uno de los elementos mediante los que se distinguen las distintas tecnologías de bomba de calor son las condiciones en

los niveles térmicos adecuados para distribuir la energía, el potencial de mejora del COP de las bombas de calor respecto a los valores actualmente disponibles en el mercado europeo, es muy importante<sup>691</sup>. Y adicionalmente, las aplicaciones recuperativas mediante el aprovechamiento simultáneo de los flujos de calor en evaporador y condensador, pueden conducir a valores más elevados del COP. También es preciso apuntar que con las tecnologías apropiadas<sup>692</sup> el comportamiento a carga parcial de las bombas de calor conduce a valores del COP muy superiores a los valores de diseño<sup>693</sup>.

Una opción para mejorar las prestaciones de las bombas de calor es emplear focos fríos de mayor temperatura en régimen de calefacción, y focos calientes de menor temperatura en régimen de refrigeración. Las bombas de calor geotérmicas buscan este objetivo al sustituir el ambiente exterior por el terreno como foco frío en régimen de calefacción y como foco caliente en régimen de refrigeración, para lo cual requieren la instalación de un intercambiador de calor con el terreno. A pesar del incremento en potencia parásita de bombeo para desarrollar el proceso de intercambio en el intercambiador geotérmico, en condiciones favorables, la mejora de las características térmicas del terreno frente al ambiente exterior proporciona una ventaja significativa de los COP<sup>694</sup>. Sin embargo, para que esta ventaja se mantenga a lo largo del tiempo es preciso que la descarga térmica del terreno en régimen de calefacción sea comparable a su recarga térmica en régimen de refrigeración, lo cual exige que las demandas de calefacción y refrigeración del edificio se encuentren equilibradas, situación que no se da en muchos emplazamientos climáticos de España. En el caso de que no se dé esta condición de equilibrio entre cargas de calefacción y refrigeración, las prestaciones de la bomba de calor se irán degradando a lo largo del tiempo

para el régimen de climatización dominante, y afectarán a la rentabilidad de la inversión en el intercambiador de calor con el terreno (GHTX). Una opción para superar esta limitación en los emplazamientos en los que domine el régimen de calefacción es el plantear un sistema solar térmico con almacenamiento estacional en el terreno que la bomba de calor va a usar como foco frío en temporada de calefacción. Este planteamiento permitiría un mejor aprovechamiento de la capacidad de los sistemas solares térmicos en temporada de verano, pero a no ser que el sistema solar térmico ya fuera contemplado para otra aplicación, incrementa significativamente la inversión en el sistema de climatización. Por otro lado, desde la perspectiva del conjunto del parque de edificios, aquellas aplicaciones en las que resulte viable la instalación de un GHTX resultan relativamente limitadas, lo cual es especialmente cierto en la rehabilitación energética del parque de edificios. Por último, teniendo en cuenta que el objetivo del contexto E3.0 es limitar la demanda de climatización hasta reducirla a valores muy bajos con el fin de no sobrecargar los requerimientos de generación y transporte del sistema eléctrico, la cobertura de esas pequeñas demandas residuales de climatización difícilmente justifica el realizar inversiones muy elevadas. Como consecuencia de estas consideraciones, en este estudio no hemos incorporado explícitamente las bombas de calor geotérmicas en el desarrollo de los escenarios E3.0, lo cual no quita para que esta tecnología pueda jugar su papel tanto en la transición hacia el contexto E3.0 como en el nicho de aplicaciones que puedan quedar asociadas a esta tecnología de cara al año 2050.

#### 3.7.6.4.2 Generación fría

La regulación en Japón de los equipos de aire acondicionado es un ejemplo de cómo se

las que se encuentran los focos frío y caliente entre los que trabajan, pues ellos condiciona fuertemente los niveles térmicos y las características de transferencia desde estos focos al fluido de trabajo de la bomba de calor. En este sentido se habla de sistemas aire-aire (a-a), aire-agua (a-w ; w = water) y agua-agua (w-w), a lo que habría que añadir los sistemas geotérmicos que son tierra-agua (g-w ; g=ground).

**691** Los elementos tecnológicos sobre los que es preciso trabajar para acercarse a estos niveles de prestaciones nominales de los equipos de bomba de calor son:

dimensionado adecuado de intercambiadores de calor, rendimiento de compresores y ventiladores, recuperación energía expansión, caídas de presión tanto en conductos interiores como en intercambiadores exteriores.

**692** Variadores de frecuencia para operación a caudal variable.

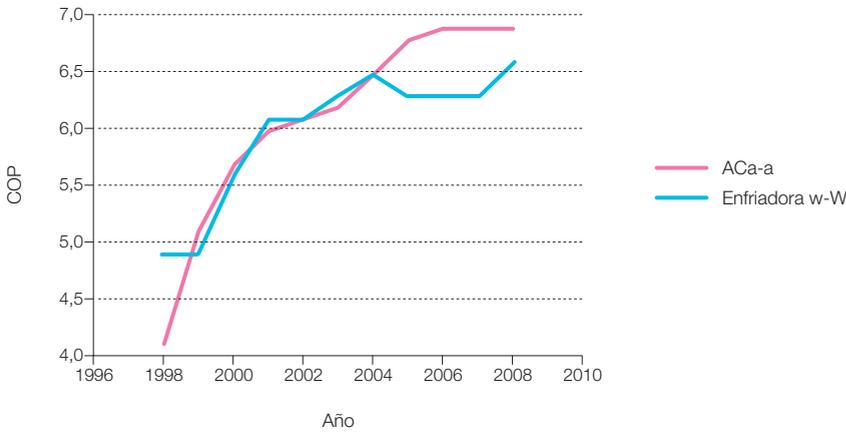
**693** En efecto, en la actualidad ya hay enfriadoras que a carga parcial alcanzan COP del orden de 20 mientras que en condiciones de diseño tienen COP del orden de seis.

**694** A igualdad de tecnologías de bomba de calor.

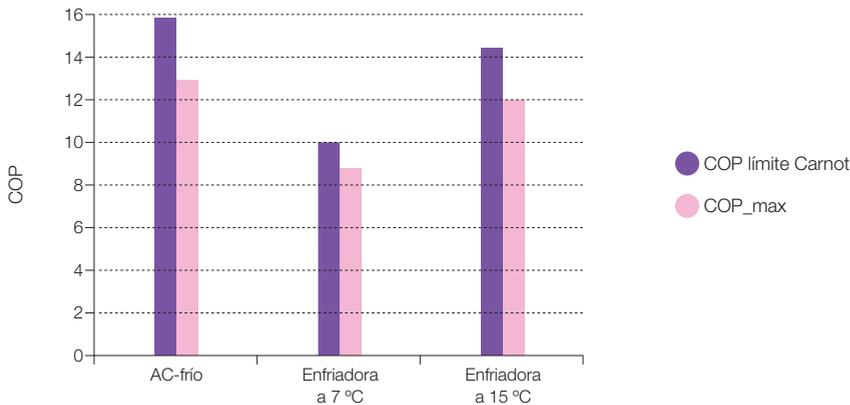
puede articular un mecanismo de cambio rápido desde la administración. En el año 1999 introdujo las Top Runner Regulations<sup>695</sup> (bajo el paraguas de la Energy Conservation Law), encaminadas a potenciar la mejora de la eficiencia energética de los electrodomésticos y

vehículos, con el resultado de que en 10 años han conseguido doblar el rendimiento de los acondicionadores de aire domésticos, contando en la actualidad con un mercado formado por equipos mucho más eficientes que los comercializados en Europa o EE. UU.<sup>696</sup>.

**Figura 314.** Evolución del COP de grandes enfriadoras agua-agua (w-w) en EE. UU. y de los pequeños equipos de aire acondicionado (AC) en Japón.



**Figura 315.** Valores límite termodinámico del COP, y valores máximos a alcanzar del COP considerando los saltos de temperatura requeridos para el intercambio de calor en condensador y evaporador, para distintos equipos de generación de frío. (AC = acondicionador de aire; enfriadora agua-agua).



<sup>695</sup> Las Top Runner Regulations hacen obligatorio para las empresas que producen o importan los equipamientos por ellas contemplados, que cada año mejoren el rendimiento del mejor producto disponible en el mercado el año anterior.

<sup>696</sup> Hasta el cuarto informe del IPCC reconoce que los equipos de aire acondicionado en Japón son mucho más eficientes que en Europa y EE. UU. En efecto: mientras los COP en Japón oscilan entre 4,5-6,2, en Europa y EE. UU. se quedan en 2,2-3,8.

En la figura 314 mostramos la evolución del COP de los pequeños acondicionadores de aire en Japón, junto con el de las grandes enfriadoras centrífugas comercializadas en EE. UU. Como puede observarse, a pesar de la gran diferencia de escala y del hecho de que los acondicionadores de aire están refrigerados por aire mientras que las grandes enfriadoras van refrigeradas por agua, el COP de ambos equipos ha seguido una evolución bastante paralela, y ha superado incluso los pequeños acondicionadores a las grandes enfriadoras en los últimos años.

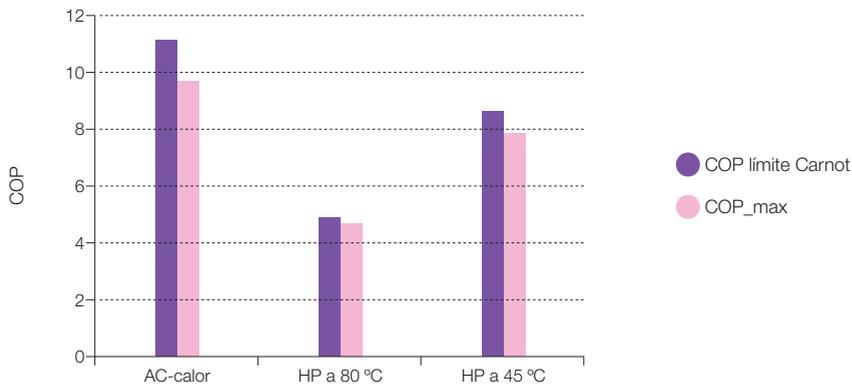
El objetivo de la regulación Japonesa no se para aquí, y en (Cool-Earth Innovative Energy Technology Program, 2008), manifiestan los objetivos<sup>697</sup> de reducir el precio a la mitad e incrementar el COP al doble (¡COP = 14!). Nosotros hemos sido un poco más conservadores a la hora de asignar los COP del contexto

E3.0. En la figura 315 presentamos los valores límites termodinámicos del COP, así como los valores máximos a alcanzar, considerando unos saltos de temperatura en evaporador y condensador que permitan desarrollarse la transferencia de calor. Para el contexto E3.0 hemos asignado un porcentaje (del orden del 85%) del COP<sub>max</sub> mostrado en esta figura.

#### 3.7.6.4.3 Generación calor

El uso de las bombas de calor para calefacción es hasta la fecha mucho más limitado que su aplicación para aire acondicionado. Incluso en Japón, donde los equipos de aire acondicionado constituyen una tecnología ampliamente diseminada y con una gran evolución tecnológica respecto al resto del mundo, la aplicación para calefacción de estos equipos se encuentra mucho más limitada.

**Figura 316.** Valores límite termodinámico del COP y valores máximos a alcanzar del COP considerando los saltos de temperatura requeridos para el intercambio de calor en condensador y evaporador, para distintos equipos de generación de calor según la tecnología de bombas de calor (AC = acondicionador de aire trabajando en modo calor; HP = bomba de calor aire-agua; HP@80 °C = bomba de calor trabajando contra un circuito de distribución de agua a 80 °C; HP@45 °C = bomba de calor trabajando contra un circuito de distribución de agua a 45 °C).



Uno de los motivos para este retraso en la introducción de las bombas de calor aire-aire o aire-agua<sup>698</sup> para calefacción ha sido la degradación de prestaciones y dificultad de trabajar con rendimientos aceptables con temperaturas exteriores bajas (que son precisamente las que se encuentran en invierno). La formación de hielo en el intercambiador exterior, y los consumos adicionales asociados al proceso de desescarche han contribuido a reducir todavía más el rendimiento de las bombas de calor en condiciones de calefacción<sup>699</sup>.

Sin embargo, en la actualidad esta situación ha cambiado, y ya se encuentran en el mercado bombas de calor con capacidad de trabajar con rendimientos aceptables incluso para temperaturas exteriores muy bajas<sup>700</sup>.

En la figura 316 presentamos los COP límite termodinámico y los COP máximos teniendo en cuenta los gradientes térmicos necesarios para desarrollar los procesos de transferencia en evaporador y condensador para distintas bombas de calor (aire-aire y aire-agua). Como podemos observar en esta figura, en el caso de las máquinas aire-agua la reducción de la temperatura del circuito de agua caliente<sup>701</sup> proporciona un importante margen de mejora. Los valores implementados en el contexto E3.0 han sido un porcentaje (del orden del 85%) de los COP<sub>max</sub> aquí indicados.

#### 3.7.6.4.4 ACS

En modo de producción de ACS<sup>702</sup>, al igual que en modo de calefacción, el uso de las bombas de calor, hasta la fecha, ha sido mucho más limitado que sus aplicaciones en acondicionamiento de aire. La reducción del rendimiento de la bomba de calor al incrementar la temperatura del foco caliente hasta las condiciones de producción de

ACS habituales (60 °C), y la dificultad de alcanzar estas condiciones de trabajo con los fluidos de trabajo empleados hasta la fecha en las bombas de calor ha limitado mucho sus aplicaciones para generación de ACS.

Sin embargo, desde hace algunos años ya se dispone en el mercado de bombas de calor con capacidad de generar ACS que se apoyan en la capacidad de proporcionar mayores gradientes térmicos a potencia reducida y aprovechan el sobrecalentamiento del gas refrigerante a la salida del compresor. Para el caso de que el modo principal de la bomba de calor sea el de refrigeración, esta producción de ACS constituye un proceso recuperativo del ciclo de trabajo de la bomba de calor, y permite incrementar de forma muy importante el COP con el que trabaja.

Pero sobre todo ha sido a lo largo de los últimos años, con el epicentro de su desarrollo una vez más en Japón, que las bombas de calor para generación de ACS están experimentando un mayor crecimiento, gracias a la introducción del CO<sub>2</sub> como fluido refrigerante para configurar bombas de calor aire-agua capaces de trabajar eficientemente con temperaturas mucho más elevadas en el condensador<sup>703</sup>. La línea EcoCute de bombas de calor con CO<sub>2</sub> en ciclo supercrítico, se introdujeron en el mercado japonés<sup>704</sup> en el año 2001, y desde entonces, su rendimiento ha ido creciendo rápidamente tal y como muestra la figura 317. En producción simultánea de frío y ACS, el COP de estas máquinas es ya en la actualidad del orden de COP = 8. El gobierno Japonés se encuentra inmerso en una gran campaña de promoción de este equipo que es de esperar que haga crecer de forma muy rápida el número de unidades instaladas, activando el mercado incluso fuera de las fronteras de Japón.

**698** Las máquinas aire-aire bombean la energía térmica desde el aire ambiente al aire en el interior del edificio. Las máquinas aire-agua bombean la energía térmica desde el aire ambiente hasta un circuito de agua empleado para distribuir la energía térmica dentro del edificio.

**699** Las bombas de calor geotérmicas resuelven este problema sustituyendo el ambiente exterior por el terreno como foco frío, consiguiendo así temperaturas del foco frío significativamente más elevadas en los instantes en que la temperatura ambiente es muy baja.

**700** Del orden de -20 °C.

**701** Lo cual implica pasar de elementos de distribución convectivos (los comúnmente denominados "radiadores") a otros con predominio radiante (suelo o muro radiante).

**702** Agua Caliente Sanitaria.

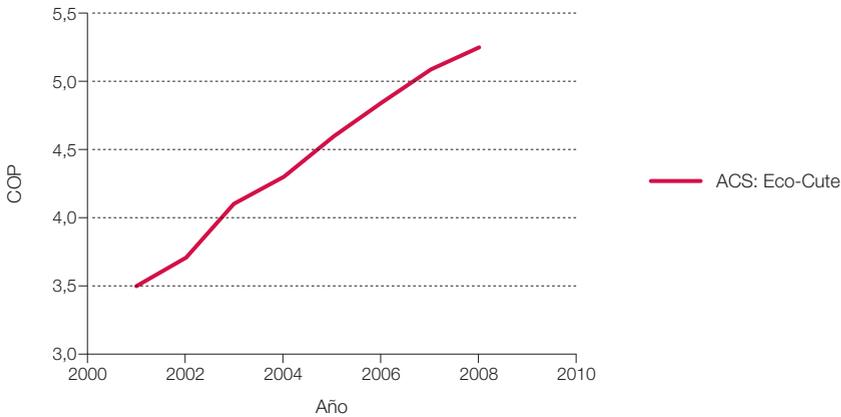
**703** Hasta 90 °C, e incluso con temperaturas exteriores de -20 °C.

**704** En Europa, y en concreto en España, la disponibilidad comercial de estos equipos es mucho más baja, pero en los últimos años ya parece que se empieza a activar el mercado.

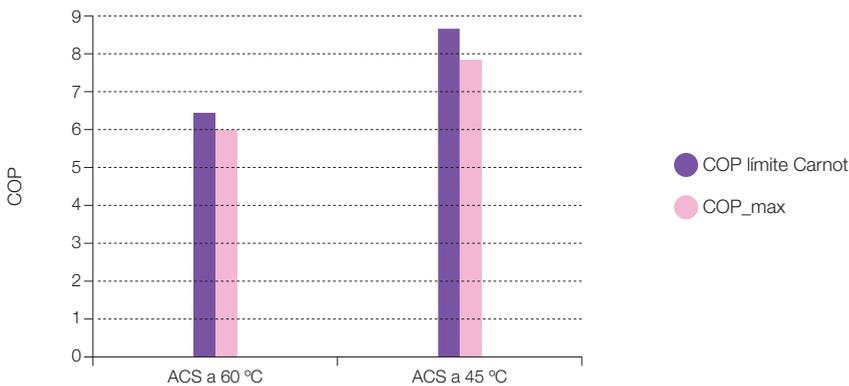
De cara a la configuración del contexto E3.0 hemos supuesto que el ACS se produce principalmente<sup>705</sup> mediante bombas de calor aire-agua. En la figura 318 mostramos los valores límite termodinámico del COP de estas bombas de calor, así como los valores máximos que cabría esperar al tener en cuenta los saltos de

temperatura necesarios en los intercambiadores de calor (evaporador y condensador) trabajando para la generación de ACS sin procesos recuperativos. Como podemos apreciar en esta figura los valores límite se encuentran bastante cercanos a los actualmente disponibles en el mercado si el ACS se prepara a 60 °C. Si

**Figura 317.** Evolución del COP de las bombas de calor de la línea Eco Cute (CO<sub>2</sub> como fluido refrigerante) desde su aparición en el mercado.



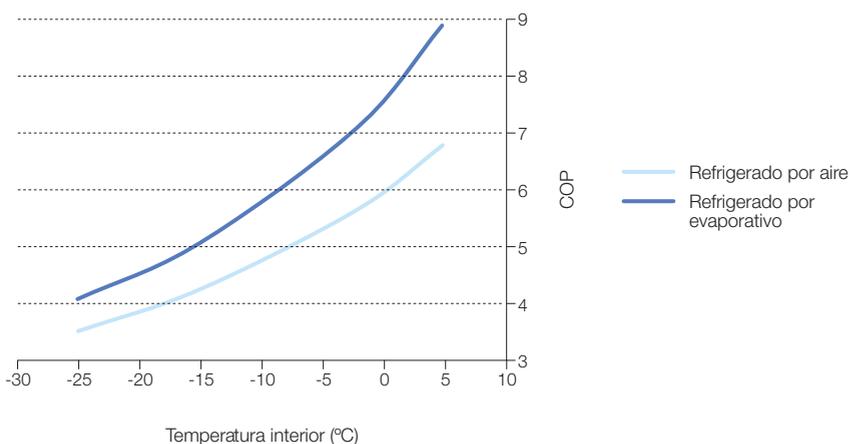
**Figura 318.** Valores límite termodinámico del COP y valores máximos a alcanzar del COP considerando los saltos de temperatura requeridos para el intercambio de calor en condensador y evaporador, para distintos equipos de generación de ACS.



**705** Respecto a la solar térmica, pese a que en el contexto E3.0 pueda resultar más difícil de justificar que en el contexto BAU, dada la contribución que cabe esperar de esta tecnología en el proceso de transición, hemos supuesto que persisten unas coberturas solares para el conjunto del parque de edificios comparables a las del contexto BAU.

reducimos la temperatura de preparación del ACS hasta temperaturas más adecuadas para el uso sin mezcla (45 °C<sup>706</sup>) vemos que todavía existe un potencial significativo de mejora del COP. Pero es más, la capacidad de generar el ACS mediante un proceso recuperativo abre la puerta a la obtención de COP estacionales más elevados que los valores mostrados en esta figura. De forma conservadora hemos asumido un COP = 7 para el contexto E3.0 en la mayoría de las situaciones, si bien este valor se ha reducido a COP = 6,5 en aquellas aplicaciones con baja demanda de frío. Por lo que se refiere a la demanda de ACS<sup>707</sup>, en la mayoría de los casos se ha asumido igual<sup>708</sup> en el contexto BAU que en el E3.0, y tan solo en aquellos casos en que se ha considerado que la aplicación de medidas de inteligencia pueden conducir a un ahorro en el consumo de volumen de ACS, hemos aplicado una pequeña<sup>709</sup> reducción en la demanda de volumen de ACS.

**Figura 319.** COP alcanzable por los equipos de refrigeración como función de la temperatura interior, para una temperatura exterior de 40 °C y humedad relativa del 50%, tanto para el caso del condensador refrigerado por aire como para el del condensador evaporativo.



### 3.7.6.4.5 Aplicaciones de refrigeración comercial

La refrigeración de alimentos o medicinas es otra de las aplicaciones en las que encontramos las bombas de calor dentro de los edificios<sup>710</sup>. En este caso las temperaturas del foco frío vienen condicionadas por los requerimientos de conservación de la sustancia interior, y pueden oscilar entre 2 °C y -25 °C según los casos.

Por otro lado, cuando estos equipos de refrigeración cuentan con condensadores exteriores, como es el caso, por ejemplo, de los supermercados, el proceso de refrigeración de la mercancía genera una carga simultánea de calefacción en la zona donde se encuentra el equipo, motivo por el que los procesos recuperativos cobran importancia.

**706** Esta sería la temperatura de trabajo durante la mayor parte del tiempo, dejando para periodos esporádicos el incrementar la temperatura hasta valores más elevados con fines sanitarios.

**707** Por lo que respecta al resto del consumo de agua, existe un gran potencial de mejora respecto a la situación actual a desarrollar, tanto mediante la aplicación de elementos de eficiencia (descargas limitadas, aireadores, limitadores de caudal), como por la introducción de elementos de inteligencia (controles de uso), y por la introducción de aguas recuperadas para cubrir parte de la demanda. Sin embargo, sus implicaciones energéticas en términos de energía final en el sector edificación son pequeñas, motivo por el que no se han incluido en el modelo del sector edificación (en el escenario del sector servicios, sí que se reflejan algunas de estas implicaciones energéticas).

**708** En términos de volumen de agua. Esta es una hipótesis conservadora que presupone que en el contexto BAU para el año 2050 se ha internalizado ya la mayoría del potencial de ahorro de ACS en términos de volumen de agua, de tal forma que la demanda de agua caliente ya se corresponde directamente con la demanda de servicio final, que en principio mantenemos igual en los contextos BAU y E3.0.

**709** Del orden de E3.0/BAU = 85%.

**710** Estos equipos aparecen tanto a nivel de aplicaciones de refrigeración en edificios terciarios, como en las neveras y frigoríficos de los edificios residenciales. Sin embargo, en este punto tratamos exclusivamente de las aplicaciones comerciales de la refrigeración. Las neveras y frigoríficos de los edificios residenciales quedan incorporados dentro del conjunto de electrodomésticos para reflejar su único impacto energético, que es su consumo de electricidad y la disipación de este consumo eléctrico dentro del espacio en el que se encuentran, pues a diferencia de las grandes aplicaciones comerciales, al tener el evaporador y el condensador de la bomba de calor en el mismo espacio del edificio, no producen efectos térmicos adicionales sobre el espacio en el que se encuentran.

En el contexto BAU vamos a suponer valores del COP de estas bombas de calor del orden de los actuales<sup>711</sup>. Pero para el contexto E3.0 vamos a explotar el potencial de mejora de estos equipos, tanto en la reducción de demanda de frío mediante la aplicación de sistemas inteligentes que minimicen las ganancias térmicas, como mediante la mejora de los sistemas de iluminación que llevan incorporados, mediante la mejora del rendimiento de los ventiladores y procesos de desescarche, y mediante la introducción de mejoras en los COP de las propias bombas de calor.

Por lo que respecta a los límites del COP que cabría esperar, la figura 319 nos los muestra en función de la temperatura interior del refrigerador para el caso de considerar una temperatura exterior de 40 °C y considerando saltos de temperatura alcanzables en los dos intercambiadores de calor con valores aceptables del área de transferencia.

En el contexto E3.0 no hemos implementado el condensador evaporativo por considerar que el consumo de agua asociado no nos compensaba la mejora en prestaciones energéticas.

Por otro lado, los COP considerados en el caso E3.0 conservan más que los presentados en la figura anterior, al haber considerado unos saltos de temperatura más elevados en los intercambiadores y un acercamiento al límite teórico del orden del 90%.

#### 3.7.6.4.6 Procesos recuperativos

Como hemos comentado más arriba, las bombas de calor, al manejar simultáneamente un flujo de calor con capacidad de refrigeración (evaporador) y otro con capacidad de calefacción (condensador), se prestan a la

implementación de procesos recuperativos en la propia máquina al usar simultáneamente los dos flujos de calor, bien de forma directa (coincidiendo en el tiempo las dos aplicaciones), o bien de forma indirecta mediante la acumulación de uno de los aportes térmicos hasta el momento en que se demande.

Las aplicaciones en las que podemos encontrar esta situación son:

- Producción de ACS en verano, cuando el edificio también demanda refrigeración.
- Simultaneidad de demanda de calor y frío en un mismo edificio. Esta condición puede darse, por ejemplo, en condiciones de invierno en edificios con elevada superficie de fachada acristalada y un nivel elevado de carga interna por equipamientos e iluminación, en los que puede coexistir una demanda de calefacción en las zonas perimetrales con una demanda de refrigeración en las zonas interiores. O bien en ciertas épocas del año en las que a lo largo de un mismo día puede haber demandas de calefacción y de refrigeración (requiere acumulación térmica para cubrir el desfase).
- Aplicaciones de refrigeración de alimentos en un edificio con requerimientos de calefacción.

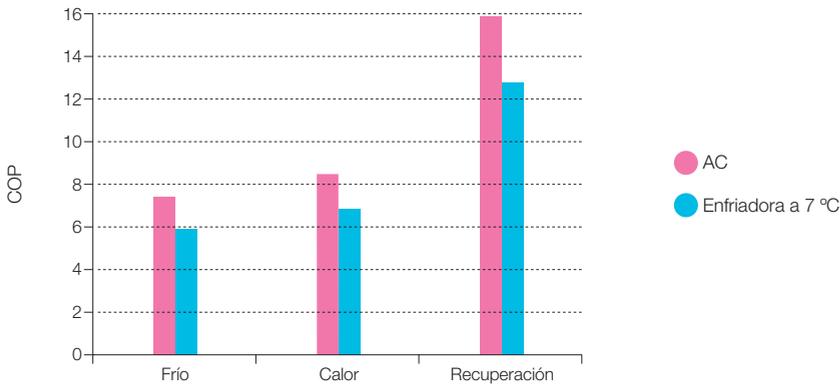
Para ilustrar el potencial de mejora de las aplicaciones de recuperación a nivel de bomba de calor, en la figura 320 presentamos un caso en el que la aplicación de calor demanda<sup>712</sup> 55 °C, y para dos aplicaciones de frío: un acondicionador de aire, y una enfriadora de agua trabajando<sup>713</sup> a 7 °C. Como podemos observar, en ambos casos la presencia del proceso recuperativo conduce prácticamente a doblar el COP que individualmente se obtiene para cada una de las dos aplicaciones.

<sup>711</sup> Que pueden oscilar entre COP = 2,5 para aplicaciones de media temperatura y COP = 1,3 para aplicaciones de baja temperatura.

<sup>712</sup> El resultado sería más favorable si la aplicación de calor demandara temperaturas menores.

<sup>713</sup> En el caso de que la enfriadora trabajara a 15 °C por haber recurrido a un medio de distribución del frío más favorable, los resultados de la enfriadora serían del mismo orden que los del AC.

**Figura 320.** Ilustración del potencial de los procesos recuperativos. AC = acondicionador de aire; decremento de temperatura del aire de refrigeración = 10 °C; temperatura de la aplicación de calor = 55 °C.



Por limitaciones de tiempo y capacidad de modelado, la aplicación de procesos recuperativos en los escenarios aquí desarrollados se ha limitado a un cierto porcentaje de recuperación en las aplicaciones de refrigeración de alimentos, y en un pequeño efecto sobre el COP de generación de ACS.

El proceso recuperativo que sí que se ha implementado mayoritariamente en el contexto E3.0 y que es independiente del uso de bombas de calor, es el asociado a recuperación térmica del aire de ventilación mediante un intercambiador de calor actuando entre el flujo de aire de extracción y el de admisión.

### 3.7.6.5 Distribución energía térmica

La distribución de energía térmica implica al medio de distribución, a los rendimientos de los equipos empleados, y a las opciones de procesos recuperativos interzonales.

Respecto a los medios de distribución, las tres opciones son emplear como fluidos

caloportadores el aire, el agua, o el fluido refrigerante de las bombas de calor. En cualquiera de los tres casos, para transportar la energía térmica desde el centro de generación a las distintas zonas del edificio, es preciso incurrir en un gasto energético (ventiladores, bombas o compresores) que dependen tanto de la red de conductos empleada para distribuir el fluido, como de los rendimientos de los equipos empleados para impulsarlo.

Como concepto general, debido a su menor densidad y bajo calor específico, el aire resulta la peor opción para el transporte de energía. Por tanto, en un contexto eficiente conviene limitar el transporte de aire a proporcionar el aporte necesario para cubrir las necesidades de ventilación. En los edificios actuales, este caudal de aire de ventilación es significativamente inferior al requerido para el transporte de energía térmica, pero en un contexto eficiente, la demanda de climatización se puede ver tan reducida que el caudal de aire requerido para cubrir las necesidades de ventilación ya resulte suficiente para satisfacer la demanda térmica,

en cuyo caso ya no sería necesario implementar ningún medio de transporte térmico adicional.

En las situaciones en que el caudal de aire de ventilación no pueda cubrir el total de la demanda térmica, el complemento debería proporcionarse mediante el uso de agua o fluido refrigerante para realizar dicho transporte, en lugar de incrementar el caudal de aire. Estas dos opciones, además de resultar más eficientes por permitir un menor consumo de energía para el transporte del fluido caloportador, habilitan la opción de implementar la recuperación térmica interzonal dentro del edificio, de tal forma que se puedan compensar las cargas simultáneas de calefacción y refrigeración reduciendo la aportación necesaria del equipo de generación. En el caso de emplear agua como fluido caloportador, esta recuperación interzonal se consigue mediante el empleo de bombas de calor (agua-aire o agua-agua) conectadas a un circuito de agua común en el que se realiza la recuperación interzonal. En el caso de emplear el fluido refrigerante, esta recuperación interzonal se consigue mediante cajas de mezcla del fluido refrigerante.

En cualquiera de las opciones (aire, agua o fluido refrigerante), el contexto eficiente implementa sistemas de velocidad variable de tal forma que se reduzca al máximo el consumo asociado al transporte del fluido en condiciones de carga parcial.

De cara a la elaboración del escenario E3.0, dadas por un lado las limitaciones de tiempo para desarrollar los modelos, y debido al impacto relativamente limitado<sup>714</sup> de las diferencias entre estas opciones para el contexto E3.0 gracias a la gran reducción alcanzada en la demanda de climatización, en la mayoría de los casos se han empleado sistemas de distri-

bución por aire. Respecto a la mejora de eficiencia de la distribución del aire, se ha considerado una mejora del rendimiento de los ventiladores<sup>715</sup>, una mejora del rendimiento de los motores eléctricos, y una reducción de la caída de presión en los conductos<sup>716</sup>.

Adicionalmente, en algunos casos se han mantenido sistemas de velocidad constante, y no se han introducido sistemas de ventilación según demanda<sup>717</sup> por las limitaciones de tiempo para el desarrollo de los modelos. Por tanto, consideramos que existe potencial de mejora respecto al contexto E3.0 que hemos desarrollado, por lo que los resultados presentados deben entenderse como valores conservadores del potencial de ahorro que se puede alcanzar.

### 3.7.6.6 Aportación solar térmica

La regulación actual (HE4 del CTE), obliga a la implementación de un sistema solar térmico en todos los edificios nuevos, con una fracción solar en la cobertura de la demanda que oscila entre el 30% y el 70% según el emplazamiento climático y el volumen de ACS consumido. Sin embargo, las excesivas vías de excepción que deja abierta la regulación actual han conducido a que la superficie de captadores realmente instalada haya sido considerablemente inferior<sup>718</sup> a la que cabía esperar cuando salió esta regulación en septiembre de 2006. Además, dado que la regulación está estipulada en función de la superficie instalada y no de la aportación real de estos sistemas solares, las contribuciones solares que proporcionan los sistemas instalados son por lo general inferiores a los valores estipulados por la regulación.

Por otro lado, tal y como comentamos en la introducción de este informe, en un contexto

**714** O incluso a la carencia de sentido de plantearse otras opciones debido a que el aporte de aire de ventilación es suficiente para cubrir la demanda en la mayor parte del año.

**715** Mejora del orden E3.0/BAU = 130%

**716** Mejoras del orden del E3.0/BAU = 50% asociadas a la posibilidad de emplear velocidades de distribución significativamente inferiores con el mismo tamaño de conductos como consecuencia de la gran reducción de requerimientos de caudal de aire a impulsar.

**717** DCV: Demand Control Ventilation.

**718** Realmente hay dos factores principales que han conducido a esta menor superficie instalada respecto a las expectativas. Por un lado, la paralización del sector de la construcción, y por otro lado, de entre aquellos edificios que sí se han construido, la aplicación de excepciones de la HE4 del CTE y la falta de control sobre la aplicación de esta normativa.

E3.0 con el sistema energético integrado y un sistema de generación 100% renovable que proporciona electricidad “residual” procedente de su regulación, y con equipos muy eficientes de producción de ACS a partir de electricidad que introducen en juego la aportación térmica del ambiente<sup>719</sup> (bombas de calor), la inversión adicional en un sistema de energía solar térmica puede quedar menos justificada que en la actualidad<sup>720</sup>.

Pero dado que en el proceso de transición hacia el contexto E3.0 la energía solar térmica sí que está, y seguirá jugando un papel importante, cabe esperar que en el horizonte del escenario que estamos desarrollando todavía cuente con una participación importante en la cobertura de la demanda. Por este motivo hemos retenido una aportación solar térmica en los escenarios desarrollados, aplicada de igual<sup>721</sup> forma a los contextos BAU y E3.0.

Según lo anteriormente comentado, la hipótesis empleada ha sido que para el conjunto del parque de edificios, para el año 2050 existirá una capacidad de energía solar térmica para producción de ACS que en media de todo el parque de edificios corresponde a un cierto porcentaje del valor estipulado en la regulación actual<sup>722</sup> para los edificios nuevos. El porcentaje implementado ha sido un 50%<sup>723</sup>.

### 3.7.7 Escenario demanda energética

En este punto agrupamos los resultados finales de los escenarios para el año 2050 de demanda energética del sector edificación.

Empezaremos presentando con más detalle los resultados de la tipología de vivienda unifamiliar, pues en ella hemos desarrollado algunos estudios paramétricos que posteriormente se han empleado<sup>724</sup> para fijar algunos

parámetros de la envolvente para otras tipologías de edificios en el contexto E3.0.

A continuación presentamos los resultados energéticos correspondientes a las distintas tipologías de edificios empleadas para describir el parque de edificios. En cada tipología de edificio empezamos por mostrar la estructura del consumo energético para dos emplazamientos climáticos extremos (Almería y Burgos), para posteriormente recopilar los resultados, tanto BAU como E3.0, a nivel provincial<sup>725</sup>.

Finalmente presentamos los resultados agregados del sector edificación para la España peninsular.

Los resultados presentados en este apartado ya descuentan la aportación autónoma de la energía solar térmica para cobertura de una parte de la demanda de ACS.

#### 3.7.7.1 Escenarios BAU y E3.0 modales

##### 3.7.7.1.1. Residencial unifamiliar

Tal y como ya indicamos anteriormente, la tipología unifamiliar está representada por un modelo de edificio de tres viviendas adosadas de dos plantas, por resultar esta la tipología que mejor representa el resto del parque de edificios residencial no constituido por bloques de pisos.

Esta primera tipología de edificio la hemos aprovechado para desarrollar algunos análisis paramétricos destinados a definir y caracterizar las condiciones de operación del contexto E3.0. Idealmente, este tipo de estudios paramétricos deberían desarrollarse para cada tipología de edificio considerada, pues las modificaciones geométricas, de uso, y de

**719** La aportación térmica del ambiente que proporciona una bomba de calor, tiene también en esencia su origen en la energía solar.

**720** Sin embargo, en el sector industrial veremos que la solar térmica cobra un mayor peso en el contexto E3.0, pues en ese sector encuentra aplicaciones donde ya no tiene la misma competencia directa de las bombas de calor y donde puede desempeñar un papel importante para ahorrar biomasa.

**721** Puesto que la regulación actual ya “obliga” a la incorporación de esta tecnología en el sector edificación, y dado el contexto de integración y electrificación del sector edificación, en principio no cabe contemplar grandes diferencias entre el BAU y el E3.0 por lo que respecta a la aplicación de esta tecnología en el sector edificación. Evidentemente el marco regulatorio se puede y debe mejorar mucho para conseguir que se vayan alcanzando los objetivos planificados de despliegue de esta tecnología, pero las modificaciones requeridas (como puede ser el establecimiento de un mecanismo tipo primas a la generación) en principio cabe esperar que ya se desplieguen en el BAU.

**722** HE4 del CTE.

**723** Hay que recalcar que este porcentaje es sobre todo el parque de edificios en el año 2050, muchos de los cuales ya fueron construidos antes de la entrada en vigor del CTE. Es decir, este valor promedio queda constituido por la contribución de un porcentaje cercano al 100% de la exigencia regulatoria en los edificios construidos según CTE (inferior al 100% porque los edificios construidos hasta la actualidad, en promedio, no incorporan el 100% de esta exigencia ni en proyecto, ni en cuanto a generación real, pero con el paso del tiempo cabe que vaya mejorando), y una contribución mucho más baja pero significativa del resto del parque de edificios, en los que presuponemos que los nuevos mecanismos de incentiación de la solar térmica activarán un cierto nicho de mercado.

**724** Lo ideal hubiera sido repetir los estudios paramétricos para cada tipología de edificio, pues las modificaciones en la geometría de su envolvente y en las condiciones de uso del edificio conducen a resultados distintos de las condiciones de diseño óptimo para cada uno de ellos. Sin embargo, debido a las limitaciones de tiempo para desarrollar este estudio,