



Policy Paper

# Descarbonización a mínimo coste: un análisis de la cartera óptima de instrumentos

FRANCISCO ÁLVAREZ

ÓSCAR ARNEDILLO

DIEGO RODRÍGUEZ

JORGE SANZ

Fedea Policy Paper 2022/02

**Febrero de 2022**

**fedea**

*Las opiniones recogidas en este documento son las de sus autores  
y no coinciden necesariamente con las de Fedea.*

## Descarbonización a mínimo coste: un análisis de la cartera óptima de instrumentos

Francisco Álvarez<sup>1</sup>, Óscar Arnedillo<sup>1</sup>, Diego Rodríguez<sup>2</sup> y Jorge Sanz<sup>1</sup>

**Resumen:** En este trabajo se propone una metodología para evaluar una cartera óptima de instrumentos que permitan minimizar los costes sociales de la descarbonización de la actividad económica al mismo tiempo que se mejoran los objetivos medioambientales propuestos en la normativa europea. Esos objetivos se refieren a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, el aumento de la generación de origen renovable y el ahorro energético. La aplicación de esta metodología a una cartera de instrumentos propuesta en el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima para el año 2030 permite concluir que es claramente posible reducir el coste social al mismo tiempo que mejorar los resultados medioambientales mediante una reorientación de los instrumentos de inversión, que en este caso se fundamentaría en una minimización de los esfuerzos en aislamiento térmico de las viviendas y una maximización de las medidas dirigidas a la instalación de bombas de calor.

**Palabras clave:** descarbonización, minimización de costes, energías renovables, aislamiento térmico, bomba de calor.

---

<sup>1</sup> NERA Economic Consulting

<sup>2</sup> Universidad Complutense de Madrid y Fedea

## 1. Introducción

El Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) 2021-2030 es el documento de referencia para definir la estrategia que se va a seguir en España para contribuir al cumplimiento de los tres objetivos medioambientales comprometidos por la Unión Europea (UE) en el escenario 2030: la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), el aumento de la participación de las energías renovables en el consumo final y el ahorro energético.

Los objetivos marcados por el PNIEC, que surge a partir del mandato del Reglamento de Gobernanza de la Unión de la Energía y de la Acción por el Clima, son sin duda ambiciosos, situándose en los tres casos por encima de los objetivos mínimos recogidos en las decisiones comunitarias en el momento de aprobación del PNIEC (marzo de 2021). Estos se referían a una reducción mínima del 40% en las emisiones de GEI respecto a 1990, una aportación de renovables del 32% en el consumo final de energía y un ahorro energético del 32,5%, calculado con respecto a un escenario tendencial de referencia (PRIMES 2007)<sup>3</sup>. Con esa referencia, el PNIEC estima que, a final de esta década, en España se producirá una penetración de renovables del 42% y un incremento del ahorro del 39,5%. La reducción de emisiones frente a 1990 será de un 23%, para lo que, dada la evolución previa en la generación de emisiones, se requiere un intenso descenso de emisiones en la presente década. Debe señalarse, además, que en estos momentos está en curso una revisión al alza de objetivos en el contexto del Pacto Verde europeo y la iniciativa *Fit for 55*. La revisión de objetivos deberá ser coherente con el aumento en la ambición climática de la UE, que se plasma en un nuevo objetivo de reducción de emisiones del 55% para 2030<sup>4</sup>. Ello requerirá, de acuerdo con las propuestas de la Comisión, una actualización de los objetivos en generación renovable (hasta el 38%-40%) y en ahorro energético (entre el 36% y 39,5%) para el conjunto de la UE.

Tras una primera versión, evaluada por la Comisión en julio de 2019, y un borrador actualizado enviado en marzo de 2020, el 31 de marzo de 2021 se publicó en el BOE la versión final del PNIEC. Dado que los objetivos marcados inicialmente por el PNIEC siguen estando por encima de los nuevos objetivos de la UE, no requerirán una revisión al alza.

El PNIEC incluye una larga lista de medidas con los instrumentos que se van a impulsar para alcanzar los objetivos medioambientales perseguidos. Para ello define dos escenarios sobre los que realiza un amplio conjunto de previsiones para el año 2030: i) un escenario tendencial que sería el resultado de no adoptar las medidas propuestas en el PNIEC, de modo que los valores que lo definen serían tan solo el resultado de las medidas regulatorias vigentes en el momento inicial y de la evolución tecnológica natural y ii) un escenario objetivo que sería el resultado de la adopción de todas las medidas contempladas en el

---

<sup>3</sup> Se trata de un ahorro (menor consumo) de energía primaria, que es la que está disponible en la naturaleza antes de su conversión (por ejemplo, la contenida en el gas natural o procedente de fuentes renovables). En este trabajo se utiliza el término *ahorro energético* en lugar del más habitual *eficiencia energética*, que puede resultar un tanto engañoso. Véase Rodríguez (2019) para una descripción de la evolución de los objetivos de ahorro energético en la UE.

<sup>4</sup> Reglamento (UE) 2021/1119 del Parlamento Europeo y del Consejo de 30 de junio de 2021.

PNIEC. Para lograr ese escenario objetivo, se prevé que las Administraciones Públicas aportarán subvenciones hasta un volumen de 39.200 M€ que, a su vez, movilizarán inversiones privadas por 156.800 M€. Son, por tanto, inversiones incrementales respecto a las que se darían en el escenario tendencial.

Sin embargo, el PNIEC no establece prioridades a la hora de impulsar los diferentes instrumentos que se proponen de forma que se garantice que la descarbonización se logra al mínimo coste para los ciudadanos. Tampoco define cómo se van a fijar las subvenciones. Estos son asuntos de gran relevancia porque los recursos públicos a comprometer son sustanciales, máxime en el nuevo contexto ocasionado por la crisis del covid-19. Efectivamente, como es bien conocido, la crisis sanitaria y económica impulsó el diseño de un potente programa de estímulo a través del *Next Generation EU*. El acuerdo europeo estipula que una parte muy sustancial de los fondos (al menos el 37%) que reciban los estados miembros deben destinarse a apoyar la transición ecológica, que también se ve beneficiada de un mayor apoyo desde el Marco Financiero Plurianual.

Para guiar el uso de esos fondos europeos, el Gobierno de España ha elaborado el Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR). El PRTR es muy amplio, pero deben destacarse aquí, por su estrecha relación con este trabajo, los componentes 2 y 7 donde se recogen, respectivamente, la implementación de la Agenda Urbana Española (Plan de rehabilitación y regeneración urbana) y el despliegue e integración de energías renovables. Las subvenciones con origen en el Mecanismo de Recuperación y Resiliencia (MRR) que se desean destinar a ambos componentes en el periodo 2021-2023 se sitúan en el entorno de 10.000 millones de euros.

En el componente 2 se asignan 6.820 M€ en distintas actuaciones que tienen como común denominador el ahorro energético. Salvo el componente de inversión C2.I2 (1.000 M€), dedicado al Programa de construcción de viviendas en alquiler social en edificios energéticamente eficientes, el resto de los programas de inversión del componente 2 se vinculan con la rehabilitación energética de edificios privados y públicos. Por su parte, el principal programa inversor en el componente 7 (C7.I1) se destina al desarrollo de energías renovables innovadoras, integradas en la edificación y en procesos productivos (2.365 M€). Ello incluye, entre otros, el apoyo a líneas de ayuda al autoconsumo eléctrico, el uso de renovables destinadas a la climatización y necesidades térmicas de los sectores residencial y servicios, o el impulso al despliegue de instalaciones de generación renovables (proyectos de carácter innovador, apoyo a la repotenciación de parques eólicos, etc.).

Por tanto, y especialmente en un contexto donde se desea utilizar un enorme caudal de recursos públicos en forma de subvenciones, resulta especialmente importante avanzar en un análisis riguroso que oriente cómo lograr los máximos efectos con los fondos disponibles. Para ello es necesario tener bien identificado tanto cuál es el objetivo a conseguir como cuáles son las restricciones que condicionan el cumplimiento de ese objetivo. Ciertamente, el PNIEC incorpora un análisis de los efectos de las medidas incluidas a partir de un modelo (TIMES-SINERGIA), que es precisamente el que obtiene como resultado una reducción de emisiones de gases de efecto invernadero del 23% para 2030. En el PNIEC se señala que ese modelo optimiza la trayectoria de distintas opciones tecnológicas para la consecución de los objetivos. Sin embargo, no es un modelo que está diseñado explícitamente para garantizar la combinación óptima de instrumentos en el

proceso de descarbonización, especialmente cuando las relaciones que se establecen entre instrumentos pueden ser complementarias o sustitutivas.

En este contexto, el objetivo de este trabajo es proponer y aplicar una metodología que garantice la eficiencia económica en el proceso de descarbonización. Con ello se pone de manifiesto que se deben fomentar exclusivamente aquellas actuaciones que permitan descarbonizar la economía a mínimo coste. Para ello se calcula, para un conjunto de instrumentos que son claves en el proceso de descarbonización, cuál es la cartera óptima para afrontar dicho proceso.

La estructura que se sigue en el trabajo es la siguiente. En la sección segunda se introduce la discusión inicial sobre la cartera de instrumentos a optimizar. En la sección tercera se reflexiona sobre las contribuciones de los instrumentos de la cartera al programa de optimización, se determinan la función objetivo y las restricciones medioambientales, se introduce la dimensión geográfica en base a zonas climáticas y se procede a plantear el programa de optimización de la cartera de instrumentos. En la sección cuarta se muestran y discuten los resultados. Finalmente, la sección quinta concluye con algunas reflexiones finales.

## **2. La optimización de la cartera de instrumentos: una discusión inicial**

En el PNIEC se incluye un conjunto muy amplio de instrumentos y medidas que se desean aplicar. Como es esperable, no hay una desagregación detallada del efecto de cada uno de ellos sobre los objetivos. En muchos casos son reformas de instrumentos regulatorios cuyo impacto individual es de difícil evaluación. Por ejemplo, las mejoras en la regulación para el acceso y conexión de las nuevas instalaciones renovables facilitan y clarifican las condiciones de entrada de nueva generación renovable, eliminando además incertidumbres y conflictividad, pero el impacto específico de esa reforma es muy difícil de discernir. Sin embargo, en otros casos, los instrumentos que se proponen implican cambios en los modos de generar o consumir energía y son susceptibles de medición. Ello abarca, por ejemplo, la nueva capacidad de generación eléctrica, la transformación del parque de vehículos o medidas de ahorro energético.

Los instrumentos propuestos pueden actuar de modo complementario o sustitutivo. Por ejemplo, la electrificación del parque de vehículos tiene mayor sentido cuanto más descarbonizada es la electricidad. Por tanto, el apoyo a la electrificación del parque de vehículos y a la introducción de renovables son dos instrumentos complementarios que, además, operan en dos dimensiones clave: la descarbonización de la generación eléctrica y del transporte<sup>5</sup>. Si hubiera que dedicar recursos públicos a apoyar a ambos, podría

---

<sup>5</sup> En teoría, la electrificación del parque de vehículos de turismo podría tener alternativas conducentes a la desaparición de emisiones, como el uso del hidrógeno como carburante de automoción. Sin embargo, hay un amplio consenso acerca de que la estrategia en ese ámbito pasará por el vehículo eléctrico. Cuestión distinta será el transporte pesado por carretera y, por supuesto, los medios de transporte distintos al de carretera. En cualquier caso, y en relación con el hidrógeno, no debe olvidarse que este también implica mayor generación renovable para su producción, pues obviamente este tendrá que ser hidrógeno “verde” producido por electrolización.

plantearse cuál de ellos priorizar en un estado inicial. Sin embargo, como se ha señalado, son dos instrumentos no alternativos y se requiere avanzar en ambos.<sup>6</sup> En el caso del vehículo eléctrico, hay un coste privado derivado de la adquisición del nuevo vehículo, al que se añaden los costes de operación y mantenimiento. Además, hay una reducción de las emisiones de GEI al pasar de las emisiones (directas) mediante hidrocarburos a emisiones (indirectas) por el consumo eléctrico.<sup>7</sup>

En algunas ocasiones el instrumento que se desea aplicar no dispone de una alternativa. Por ejemplo, reducir las emisiones del alumbrado público solo puede hacerse cambiando la fuente lumínica mediante bombillas LED que tienen menor consumo, tal vez acompañado de algún mecanismo inteligente que optimice el procedimiento de encendido y apagado de forma que éste no responda a un horario prefijado sino que sea función de las condiciones lumínicas en cada momento. En esta ocasión, frente al caso del vehículo eléctrico, no hay un cambio en la fuente energética, que sigue siendo eléctrica (y que, por supuesto, debe estar más descarbonizada). Por tanto, no hay un impacto por el desplazamiento de una energía por otra y la comparación “privada” se establece considerando los costes de la inversión (reemplazamiento de las bombillas) y los costes de operación (menor consumo energético). Para un mix de generación eléctrica determinada, el efecto sobre las emisiones se deriva del ahorro energético.

En otras ocasiones, sin embargo, los instrumentos son sustitutivos. Un ejemplo claro se produce en la calefacción de los hogares, con dos alternativas. Por un lado, se puede invertir en aislamiento térmico de la vivienda, que no cambia la fuente energética, habitualmente gas, pero sí reduce el consumo energético requerido. Por otro lado, se puede cambiar la fuente de abastecimiento energético del gas a la electricidad mediante el uso de bombas de calor. En un sentido general puede parecer que no son decisiones alternativas, ya que ambas opciones permiten disminuir las emisiones actuando sobre distintos elementos: bien mediante un menor consumo o bien mediante un consumo con menores emisiones. Sin embargo, ambas decisiones implican costes de transformación, ya sea por inversión en aislamiento (fachadas, ventanas, ...) o por inversión en nuevo equipamiento (bombas de calor), de modo que la rentabilidad de cada opción es muy sensible a si previamente se ha optado (o no) por invertir en la otra. Por ejemplo, la rentabilidad de aislar térmicamente una vivienda es muy diferente si ésta se calienta con una caldera de gas o si ya se ha invertido en una bomba de calor. Por lo tanto, en un contexto de recursos limitados, la decisión óptima debe inclinarse por aquella que tenga el máximo efecto sobre el objetivo perseguido al mínimo coste posible y, en este contexto, ambas opciones sí son mutuamente excluyentes.

¿Sobre qué variable puede medirse ese efecto? En sentido estricto, solo debería haber un objetivo último a satisfacer, que es la reducción de emisiones de GEI, pues son éstas las causantes del cambio climático. Sin embargo, aunque el aumento en la penetración de renovables y el ahorro energético son realmente instrumentos conducentes a lograr el

---

<sup>6</sup> Es más, en este caso, se puede considerar la complementariedad que surge entre ambas en la medida en que las baterías de los coches se usen como un mecanismo de estabilización de la red (Vehicle-to-Grid) que facilite la penetración de renovables no gestionables.

<sup>7</sup> Ya con el mix actual de generación eléctrica en España las emisiones indirectas de un vehículo eléctrico son claramente inferiores a las emisiones por combustión.

objetivo final de descarbonización, la regulación europea estipula objetivos mínimos (niveles) a satisfacer en todos ellos. Por tanto, teniendo en cuenta la satisfacción de esos objetivos mínimos, parece obvio que las decisiones de inversión se orienten hacia aquellos instrumentos que permitan minimizar los costes asociados. Dicho de otro modo, no tiene sentido que la composición de la cartera de instrumentos que se utilizan sea la misma en Suecia que en España, del mismo modo que no puede ser la misma en Sevilla que en Burgos, pues el coste de descarbonizar utilizando unos instrumentos u otros es muy diferente entre zonas geográficas.

En este sentido, la inversión en aislamiento térmico siempre será más rentable en países septentrionales en los que el consumo de calefacción sea elevado y, por tanto, mayor el valor del ahorro de energía con el que recuperar la inversión. Por su parte, la inversión en paneles solares FV será más rentable en países meridionales, con elevados niveles de insolación.

Como se ha señalado, el objetivo de este trabajo es proponer e implementar una metodología que permita identificar cuál es esa cartera óptima para abordar el proceso de descarbonización. Dada la diversidad de instrumentos, se han escogido cuatro de ellos: inversión en generación fotovoltaica, inversión en generación eólica, inversión en aislamiento térmico de viviendas e inversión en bombas de calor. La selección de estos cuatro instrumentos tiene en cuenta que son instrumentos centrales en la descarbonización del consumo energético. De hecho, son cruciales en la descarbonización del consumo energético de los hogares. También son importantes para las empresas, aunque en mucha menor proporción ya que el consumo de calefacción es una parte muy pequeña del consumo energético por parte de las empresas. El otro instrumento clave, no incluido en el análisis que aquí se realiza, se refiere a la descarbonización del transporte. En cualquier caso, la metodología del análisis que aquí se propone puede extenderse con facilidad a otros instrumentos.

En los cuatro instrumentos, el PNIEC plantea un conjunto de actuaciones que caracterizan el denominado *escenario objetivo* y que, en este trabajo, se designa como  $\Omega$ . El nivel inicial de la cartera de instrumentos (*cartera inicial*) que va a ser objeto de análisis se ha obtenido como diferencia entre los niveles asociados al *escenario objetivo* del PNIEC y los niveles existentes en 2020 según el mismo PNIEC. En concreto:

- En potencia solar fotovoltaica (FV), el *escenario objetivo* del PNIEC señala que en 2030 se habrán instalado en torno a 39.000 MW frente a los casi 9.000 MW existentes en 2020 (Tabla A.19 del PNIEC<sup>8</sup>). Por tanto, se considera que el escenario objetivo añade 30.000 MW de potencia solar FV por encima de lo que hay en la cartera inicial. El PNIEC no prejuzga si los paneles solares se instalarán en plantas centralizadas o de forma distribuida.

---

<sup>8</sup> Las referencias al PNIEC se hacen sobre la versión final publicada en el BOE de 31 de marzo de 2021. Debe hacerse notar que el volumen para 2020, que era el estimado antes de finalizar ese año, no se corresponde exactamente con el realmente existente a 31 de diciembre de ese año. Ello es especialmente cierto en el caso de la solar FV, donde la potencia instalada fue superior. Por homogeneidad de criterio, siempre se utiliza lo recogido en el PNIEC, pero esas pequeñas diferencias no modifican el contenido ni las conclusiones de este trabajo.

En este ejercicio se ha optado por las plantas centralizadas porque tienen un menor coste por unidad de energía producida y puesta a disposición del consumidor que las plantas distribuidas<sup>9</sup>. Ello es así porque el valor del ahorro de inversión asociado a las economías de escala de las plantas de generación centralizadas supera al valor del ahorro de pérdidas en la red de las plantas de generación distribuidas y, además, éstas no suponen ahorros en costes de red, pues los periodos de congestión de estas infraestructuras coinciden con horas en las que no hay insolación.

En el ejercicio que se realiza no se incluyen cargos<sup>10</sup> ni impuestos debido a que nuestro objetivo es minimizar el coste para la sociedad (de forma coherente con la maximización del bienestar social) y los impuestos no son un coste social sino una transferencia de rentas.

- En el caso de la potencia eólica, el *escenario objetivo* señala que en 2030 se habrán instalado en torno a 50.000 MW frente a casi 30.000 MW existentes en 2020 (Tabla A.19 del PNIEC). Por tanto, se considera que el escenario objetivo añade 20.000 MW de potencia eólica por encima de lo que hay en la cartera inicial. El PNIEC no prejuzga si los parques eólicos serán terrestres o marinos. En este ejercicio, se ha optado por parques terrestres porque, con el estado tecnológico actual y previsible en esta década, tienen un menor coste unitario por energía generada que los marinos, especialmente teniendo en cuenta que en España las condiciones de plataforma continental para parques eólicos marinos de sujeción fija no son favorables y habría que optar por los flotantes, que prácticamente se encuentran aún en desarrollo pre-comercial<sup>11</sup>.
- En el caso de las inversiones en aislamiento térmico de viviendas, el PNIEC propone destinar ayudas públicas para aislar térmicamente 1.200.000 hogares entre 2020 y 2030 (Medida 2.6 del PNIEC). En este caso se asume que ésta es la cifra que aporta el aislamiento térmico de edificios a la cartera inicial de instrumentos. El ahorro de energía final acumulado que el PNIEC estima para el conjunto del periodo (con una determinada gradualidad en la rehabilitación de viviendas) es de 4.755,9 ktep (miles de toneladas equivalentes de petróleo)

---

<sup>9</sup> El 21 de diciembre de 2021 el Consejo de Ministros aprobó la Hoja de Ruta del Autoconsumo en la que, sobre la base de un informe del IDAE, se plantea un objetivo de potencia instalada asociada al autoconsumo de 9.000 MW para el año 2030. Cabe prever que gran parte de ese objetivo provenga de generación FV, aunque también integre otras tecnologías (particularmente, cogeneración). La introducción de este nuevo objetivo, no contemplado en el PNIEC, no es objeto de análisis en este trabajo.

<sup>10</sup> La normativa del sector eléctrico define como “cargos” a la parte de las tarifas de acceso que permiten financiar los costes no relacionados con el suministro (sobrecostes de renovables, territorios no peninsulares y servicio de la deuda).

<sup>11</sup> Ello no impide que en próximos años pueda comenzar a observarse el desarrollo inicial de algunos pequeños parques de eólica flotante, fundamentalmente en zonas marítimas de Galicia, País Vasco y Canarias.



- En el caso de las bombas de calor, en el PNIEC no hay referencia a un número de hogares que las instalan<sup>12</sup>. Sí que se señala que en el *escenario objetivo* para 2030 las bombas de calor suministrarán 3.523 ktep/año de energía renovable<sup>13</sup>, frente a 629 ktep/año en 2020 (Tabla A.13 del PNIEC). La diferencia (2.894 ktep/año) es imputable a la generación de calor y frío en diferentes sectores (residencial, servicios e industria). El ejercicio que aquí se realiza, sin embargo, se centra en el sector residencial. Por tanto, para definir la cartera inicial de instrumentos se supone que una parte de esa diferencia se corresponde con generación de calor en el sector residencial (hogares). Esa generación equivale aproximadamente al equipamiento de 200.000 hogares de tamaño medio (90 m<sup>2</sup>), con cuatro *splits*<sup>14</sup> de calor por hogar. Las conclusiones del análisis no son sensibles a estos supuestos.

El Cuadro 1 resume las cantidades de cada uno de los cuatro instrumentos que se van a considerar en la cartera inicial, que se corresponden con el *escenario objetivo* del PNIEC en 2030. Tal y como se describió con anterioridad, esta cartera inicial refleja cantidades por encima de los niveles existentes en 2020 para cada instrumento.

**Cuadro 1. Instrumentos de la cartera inicial**

<b>Potencia Solar fotovoltaica (x<sub>1</sub>)</b>	<b>Potencia Eólica (x<sub>2</sub>)</b>	<b>Aislamiento Térmico (x<sub>3</sub>)</b>	<b>Bombas de calor (x<sub>4</sub>)</b>
30.000 MW	20.000 MW	1.200.000 hogares	200.000 hogares

Cada uno de los cuatro instrumentos descritos contribuye con distinta intensidad a cada uno de los tres objetivos planteados (descarbonización, energías renovables y ahorro energético) y que, además, lo hacen afrontando distintos costes. Sin embargo, el PNIEC no garantiza que la combinación propuesta permita alcanzar la descarbonización a mínimo coste. En particular, los objetivos de renovación de viviendas con aislamiento térmico y de bombas de calor son objetivos que, debiendo perseguir ambos el fin común de reducción de emisiones de GEI, actúan sobre mecanismos distintos: en el primer caso, sobre la reducción del consumo de gas y, en el segundo, sobre la sustitución del consumo de gas por una energía eléctrica (con una participación elevada de las energías renovables en el mix de generación) y por energía renovable capturada directamente del exterior de la vivienda .

<sup>12</sup> En la medida 2.6 del PNIEC hay una referencia a la renovación de instalaciones térmicas en más de 300.000 viviendas/año. Dicha renovación puede afectar a diversos componentes (renovación de calderas, por ejemplo), sin que el PNIEC desglose el tipo de actuaciones específicas que se contemplan.

<sup>13</sup> La bomba de calor extrae calor del ambiente y se considera que contribuye al objetivo de energía renovable cuando funciona en modo de calefacción y tiene un elevado rendimiento. Véase el Anexo 2 para una explicación más detallada. En este informe nos referimos en todo momento a la bomba de calor aire-aire.

<sup>14</sup> Un *split* es una unidad de climatización (calor y frío) que está en el interior de la vivienda y que requiere también de una unidad exterior o compresor. La unidad exterior puede ser compartida por varios *splits*, lo que se suele denominar *multisplit*.

Por tanto, el primer paso para garantizar la eficiencia en el proceso de descarbonización consiste en analizar si es posible optimizar la cartera. Es decir, si hay combinaciones distintas de los mismos instrumentos que se incluyen en el PNIEC que alcancen, al menos, los mismos objetivos ambientales asociados a dicha cartera inicial, medidos en términos de reducción de emisiones, generación renovable y ahorro energético, pero con un coste social inferior.

### 3. El coste social y la contribución de los instrumentos

#### 3.1 Definición y cálculo de la función objetivo

La cartera de instrumentos óptima será aquella que minimice el *coste social* de descarbonizar, es decir, la que minimice el coste en que incurre la sociedad para alcanzar los objetivos marcados. Por tanto, el coste social es la función objetivo que se debe minimizar para establecer las prioridades en el uso de los instrumentos.

El coste social tiene cuatro componentes:

- Las anualidades de las inversiones asociadas a cada uno de los cuatro instrumentos de la cartera (potencia solar FV, potencia eólica, aislamiento térmico y bombas de calor) más, en su caso, los correspondientes costes anuales de operación y mantenimiento (O&M). Para el cálculo de las anualidades se ha utilizado un coste financiero del 6% para todos los instrumentos<sup>15</sup>.
- El valor del ahorro anual de consumo de gas natural y de emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas al uso de calderas de gas natural<sup>16</sup> y derivado de la inversión en aislamiento térmico o en bombas de calor.
- El valor incremental del gas natural consumido por las centrales de ciclo combinado, para lo que se utiliza el precio del gas natural previsto en el PNIEC para 2030 (37,8 €/MWh<sub>g</sub>). Esas centrales ya realizaron las inversiones necesarias para la entrada en el pasado y hay capacidad ociosa, por lo que no se considera que pueda ser necesaria entrada de nuevas centrales de este tipo<sup>17</sup>.

---

<sup>15</sup> Nótese que se asume el mismo coste financiero para todos los instrumentos, evitando así posibles sesgos derivados del reconocimiento de distintas tasas de descuento. Véase Steffen (2020) para una discusión sobre la estimación del coste de capital en proyectos renovables y una revisión de aproximaciones metodológicas.

<sup>16</sup> En la actualidad los usuarios residenciales no pagan por el CO<sub>2</sub> emitidos en las calderas de calefacción de sus hogares. La propuesta de revisión actual en el marco del *Fit for 55* extiende el Régimen Europeo de Comercio de Derechos de Emisión al sector residencial a partir de 2026. Sin embargo, nótese que el análisis que aquí se realiza evalúa el coste social de las emisiones, por lo que es indiferente si el hogar está pagando o no por dichas emisiones en la actualidad.

<sup>17</sup> Dada la reducida utilización de la capacidad de las centrales de ciclo combinado, cabría contemplar también los costes asociados a mecanismos de capacidad. Los mecanismos de capacidad retribuyen la disponibilidad de algunas centrales térmicas u otras tecnologías para proporcionar energía en todo momento (potencia firme) al operador del sistema. Sin embargo, el

- El valor incremental de las emisiones de CO<sub>2</sub> asociado a las emisiones de las centrales que utilizan gas natural, para lo que se utiliza el precio de los derechos de emisión previsto en el PNIEC para 2030 (34,7 €/tonelada CO<sub>2</sub>).

En consecuencia, para el cálculo del *coste social* es necesario tener en cuenta tanto los costes directos (netos) asociados a dichos instrumentos como los efectos que estos tienen sobre el equilibrio en el mercado eléctrico. Esto es así porque, con carácter general, las decisiones sobre un instrumento afectan a los niveles de equilibrio de otros. Por ejemplo, más bombas de calor implican más demanda eléctrica, lo que condiciona los precios del mercado de generación de electricidad y, por tanto, las decisiones de entrada de energías renovables, el consumo de gas y las emisiones de CO<sub>2</sub>.

La caracterización del equilibrio en el mercado de generación de electricidad (precios y cantidades) se realiza para las 8.760 horas del año 2030, tomando como referencia el escenario objetivo del PNIEC y una cartera de instrumentos  $\{x_i\}_{i=1}^4$ . Dado el elevado grado de acoplamiento entre los mercados español y portugués, el mercado de referencia en los cálculos es todo el MIBEL<sup>18</sup> y no sólo el mercado español. Para Portugal, el escenario eléctrico de referencia en 2030 se ha construido a partir de los *National Trends* incluidos en el documento de escenarios de desarrollo de la red de transporte de la Asociación europea de empresas transportistas y operadoras del sistema eléctrico (ENTSO-E, 2020). En el Anexo 1 se ofrecen algunas características adicionales de la modelización efectuada.

La simulación del equilibrio del mercado eléctrico permite obtener los consumos de gas natural en las centrales de ciclo combinado para cada una de las 8.760 horas del año. A partir de esos consumos se calcula el valor del gas natural consumido y el valor del CO<sub>2</sub> emitido. Como se ha señalado, ambos valores forman parte del coste social asociado a dicha cartera de instrumentos.

Es importante enfatizar que, en el cálculo del *coste social*, sólo se tiene en cuenta el coste incremental (o el evitado) imputable a la energía neta ahorrada, sin tener en cuenta impuestos/subvenciones o “cargos” pues éstos afectan al *coste privado* que observan los inversores, pero no al *coste social*. El *coste social*, por tanto, difiere del *coste privado* al que se enfrentan los inversores debido a la existencia de impuestos (o subvenciones) o de sobre costes incluidos en los precios que no reflejen costes marginales.

La elección del año de referencia condiciona los resultados del ejercicio, pues el precio de la electricidad y el mix tecnológico en el mercado eléctrico van a evolucionar a lo largo del periodo de vida útil de los diferentes instrumentos. Estos dos parámetros son claves. Por un lado, la valoración económica de la energía ahorrada se hace utilizando su precio de mercado. Como se ha señalado, ese precio no está predeterminado, sino que se calcula como el precio de equilibrio de mercado resultante de i) las condiciones de oferta (mix de generación, precios del gas y CO<sub>2</sub>) y demanda supuestas en el PNIEC para 2030 y ii) el volumen de los cuatro instrumentos que se evalúan. Por otro lado, el efecto sobre la

---

desarrollo normativo de estos mecanismos se encuentra actualmente en fase de información pública y no es posible anticipar su coste.

<sup>18</sup> Mercado Ibérico de Electricidad.

reducción del coste de las emisiones va a depender de cuál es la fuente de generación desplazada y cuál es el mix de generación eléctrica en ese momento.

En el ejercicio se utiliza 2030 como año de referencia por ser el año en el que el PNIEC actual establece sus objetivos. Además, se trata de un año intermedio en el que se debe avanzar para alcanzar el objetivo final de balance neto de cero emisiones de gases de efecto invernadero en la UE, establecido para 2050.

Analíticamente, el coste social CS de la cartera definida por  $\{x_i\}_{i=1}^4$  se define como:

$$CS(\{x_i\}_{i=1}^4) = \sum_{i=1}^4 \alpha_i \cdot x_i + F(\Omega; x_1; x_2; x_4)$$

donde:

- El coste social es la suma de los efectos directos ( $\sum_{i=1}^4 \alpha_i \cdot x_i$ ) que se asocian con la cartera de instrumentos y los efectos indirectos que se canalizan a través del sector eléctrico, recogidos por la función  $F()$ . Específicamente, se denomina  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  y  $x_4$  a las cantidades -por encima de los niveles existentes en 2020- de los cuatro instrumentos de la cartera: potencia solar FV, potencia eólica, viviendas aisladas térmicamente y viviendas con instalación de bomba de calor, respectivamente. De ese modo, se denotan como  $x_1^0$ ,  $x_2^0$ ,  $x_3^0$  y  $x_4^0$  a las cantidades -por encima de los niveles existentes en 2020- de esos cuatro instrumentos en la cartera inicial construida a partir del *escenario objetivo* del PNIEC ( $\Omega$ ) y cuyos valores figuran en el Cuadro 1. Es decir:  $x_1^0 = 30.000$  MW de potencia solar FV;  $x_2^0 = 20.000$  MW de potencia eólica;  $x_3^0 = 1,2$  millones de viviendas aisladas térmicamente; y  $x_4^0 = 200.000$  viviendas con bomba de calor.
- Los efectos directos captan los impactos ( $\alpha$ ) de cada uno de los cuatro instrumentos de la cartera sobre los componentes del coste social, esto es:
  - $\alpha_1$  es la anualidad de la inversión en 1 MW de potencia solar FV más los costes anuales de O&M. Por definición, ese parámetro es positivo ( $\alpha_1 \geq 0$ ). Se mide en €/MW y año.
  - $\alpha_2$  es la anualidad de la inversión en 1 MW de potencia eólica más los costes anuales de O&M. De nuevo,  $\alpha_2 \geq 0$  y se mide en €/MW y año.
  - $\alpha_3$  es la anualidad de la inversión que hay que acometer para aislar térmicamente una vivienda media de 90 m<sup>2</sup>, menos el valor del gas natural y del CO<sub>2</sub> ahorrados anualmente en la caldera de gas tras el aislamiento térmico. El signo de  $\alpha_3$  no está predeterminado. Se mide en €/vivienda y año.
  - $\alpha_4$  es la anualidad de la inversión que hay que acometer para instalar una bomba de calor en una vivienda media de 90 m<sup>2</sup>, menos el valor del gas natural y del CO<sub>2</sub> ahorrados anualmente en la caldera de gas tras la

instalación de la bomba. El signo de  $\alpha_4$  no está predeterminado. Se mide en €/vivienda y año.

- El efecto indirecto de la cartera de instrumentos,  $F(\Omega; x_1; x_2; x_4)$  es el valor (en €/año) del gas natural consumido y del CO<sub>2</sub> emitido en el sector eléctrico a lo largo de las 8.760 horas del año de referencia (2030), simulado con las características del *escenario objetivo* ( $\Omega$ ) del PNIEC, pero, en este caso, con una cartera de instrumentos definida por  $x_1$ ,  $x_2$  y  $x_4$ .

Obsérvese que  $x_3$  (viviendas aisladas térmicamente) no afecta al valor de  $F$ , pues el aislamiento térmico sólo tiene efectos sobre el consumo de gas en el hogar, pero no sobre la electricidad demandada. Sin embargo,  $x_4$  (bombas de calor) sí afecta a  $F$ , pues aumenta la demanda eléctrica. Para la modelización del uso de la bomba de calor a lo largo del año, primero se ha estimado la necesidad diaria de calefacción (la cual aumenta o disminuye siguiendo la diferencia entre la temperatura media diaria registrada y una temperatura considerada de confort). A continuación, se calcula el consumo de electricidad de la bomba de calor en cada hora a partir del perfil de utilización de la bomba de calor para calefacción. En el Anexo 2 se detalla el procedimiento utilizado para ello.

Por último, para el cálculo de los valores de  $F$  se ha utilizado PLEXOS como instrumento de modelización (ver Anexo 1).

En el Anexo 3 se detallan los parámetros técnicos de los cuatro instrumentos de descarbonización, tanto en términos de costes como de efectos medioambientales. Estos últimos se describen a continuación.

### 3.2 La contribución de los instrumentos de descarbonización

Con el fin de obtener una cartera óptima de instrumentos, se plantea un problema de optimización en el que la función objetivo a minimizar es el *coste social* asociado a la cartera de instrumentos. Esa minimización se somete a tres restricciones, esto es, una por cada uno de los objetivos medioambientales ya descritos: la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>, el aumento de la generación renovable y el ahorro energético. Con el fin de tener una métrica homogénea, las mediciones del coste social y de los tres objetivos medioambientales son anuales y se referencian al año 2030, al ser este el último año del PNIEC para el que están contruidos los objetivos. Antes de formalizar en detalle esas tres restricciones, es conveniente detenerse brevemente para ofrecer una intuición acerca de cómo puede contribuir cada instrumento al coste social y al cumplimiento de esos tres objetivos medioambientales.

La contribución de cada instrumento depende de sus características idiosincráticas. En el caso de los cuatro aquí considerados, podría parecer inicialmente que los vinculados a los hogares (aislamiento y bomba térmica) sólo tienen efectos sobre el ahorro y las emisiones, mientras que los vinculados a la generación (FV y eólica) sólo tienen efectos sobre la generación renovable y las emisiones. Sin embargo, en casi todas las ocasiones los instrumentos contribuyen a los tres objetivos. De hecho, como se detallará a continuación,

la única excepción es el aislamiento térmico, que no tiene efectos sobre la producción de energía renovable. A continuación, se describen esas contribuciones que, por claridad expositiva, se refieren a una unidad de medida: 1 MW de potencia instalada (en potencia solar FV o eólica) o un hogar (en aislamiento o bombas de calor).

### ***- Contribución de la energía solar FV***

La energía generada por la instalación de 1 MW de paneles solares fotovoltaicos permite sustituir la generación de energía eléctrica con el mix tecnológico que corresponda a las horas en las que tenga lugar la inyección a la red a lo largo del año de referencia. Por tanto, es clave conocer cuál es la generación eléctrica a la que ese nuevo MW de solar FV sustituye, pues los efectos sobre la reducción de emisiones y sobre la generación renovable van a depender de cuál es esa generación que resulta desplazada<sup>19</sup>.

En concreto, solo hay reducción de emisiones de GEI si se sustituye energía producida por centrales de gas de ciclo combinado. Ello es así porque en el escenario objetivo del PNIEC se asume que todas las centrales de generación de carbón estarán cerradas en 2030. En consecuencia, para calcular la reducción de consumo de dicho combustible y, por tanto, de emisiones de CO<sub>2</sub>, es necesario tener en cuenta la contribución de los ciclos combinados al mix de generación en las horas en las que se inyecta a la red la energía eléctrica procedente de la nueva inversión en la planta solar FV.

En el mismo sentido, se calcula el incremento neto de energía renovable a partir de la energía bruta generada por el panel instalado, a la que se le resta la energía renovable desplazada a lo largo del año en base a las horas en las que tenga lugar la inyección a la red y en las que las renovables formen parte del mix de generación.

La instalación de 1 MW de solar FV genera también un ahorro de energía primaria<sup>20</sup>, para lo que nuevamente hay que tener en cuenta la energía que antes se producía en el sector eléctrico con combustibles fósiles (gas natural) y que pasa a ser sustituida por energía solar.

Además, en el cálculo de las contribuciones sobre las emisiones, sobre la energía renovable (neta) y sobre el ahorro de energía primaria asociada a la instalación de 1 MW se tiene en cuenta la interacción con otros instrumentos a través de la modelización del mercado eléctrico.

---

<sup>19</sup> Esta es una descripción desde el lado de la oferta (generación) aunque, como se explicará a continuación, la demanda de energía también puede modificarse por otros instrumentos.

<sup>20</sup> El ahorro surge porque desplaza parte de la generación procedente de fuentes en las que se necesita más de una unidad de energía primaria para producir una unidad de energía final. En concreto, una unidad de energía eléctrica producida en una central que usa gas (ciclo combinado) requiere, aproximadamente, de dos unidades de energía primaria de gas (relación 2:1). La metodología de balances energéticos (véase Eurostat, 2019) indica que en el caso de la energía eólica y solar, en las que no hay una transformación térmica y por tanto no hay pérdida en forma de calor, se utiliza la producción eléctrica para la medición del consumo primario. Ello implica que, en estos casos, la relación entre energía primaria y final es 1:1 por convención.

Por último, para el coste social, hay que tener en cuenta la anualidad de la inversión de 1 MW más el coste anual de O&M, menos el valor del combustible (gas natural desplazado) y del CO<sub>2</sub> evitado.

#### **- Contribución de la energía eólica**

Todo lo anterior se aplica del mismo modo a 1 MW instalado de energía eólica, con la única particularidad de que la energía sustituida tiene en cuenta el mix de generación que corresponde a las horas de inyección a la red de la energía eólica generada.

#### **- Contribución del aislamiento térmico**

Se supone que la inversión en aislamiento térmico es de tipo SATE<sup>21</sup> y que tiene lugar en un hogar con un tamaño medio de 90 m<sup>2</sup> con una caldera doméstica de gas natural para la calefacción. El aislamiento conlleva el ahorro de una cantidad específica de energía consumida en forma de calor al año, dato para el que el IDAE proporciona una estimación que será la que utilizaremos en nuestro análisis. Partiendo también de una estimación de la eficiencia de la caldera doméstica<sup>22</sup> y de la tasa de emisiones derivada de la quema del gas natural en la caldera, se calcula el consumo de gas y las emisiones de CO<sub>2</sub> ahorradas anualmente por cada hogar. Sin embargo, y a diferencia de los otros instrumentos, esta actuación no aporta nada a la producción de energía renovable ya que el input energético, tras el aislamiento, sigue siendo el gas natural.

Por último, para el coste social, hay que tener en cuenta la anualidad de la inversión en el aislamiento térmico de la vivienda, menos el valor del combustible ahorrado por el hogar (gas natural) y del CO<sub>2</sub> evitado.

#### **- Contribución de la bomba de calor**

En el caso de la bomba de calor, se supone que se instala en un hogar que hasta ese momento también cubría sus necesidades de calefacción con una caldera de gas natural. La inversión en una bomba de calor de 3,5 kWt con cuatro *splits* permite cubrir las necesidades de energía térmica de un hogar de 90 m<sup>2</sup> a partir de la energía aerotérmica captada en el exterior de la vivienda (que, si el SCOP del equipo supera un determinado umbral, tiene consideración de energía renovable<sup>23</sup>) y a partir de energía eléctrica. El funcionamiento de

---

<sup>21</sup> El aislamiento térmico tipo SATE contemplado en este análisis consiste en la instalación de paneles aislantes en las fachadas del edificio y en el tejado (habitualmente, de fibra de caucho, poliuretano o poliestireno) y la instalación de carpintería de aluminio en las ventanas para evitar el *punto térmico* y la consiguiente pérdida de energía desde los hogares hacia el exterior. Para más información, véase IDAE (2012).

<sup>22</sup> En concreto, se ha supuesto una caldera doméstica de condensación cuya eficiencia, definida como la relación entre el calor absorbido y calor generado, es del 98%. El resto (2%) son pérdidas de calor.

<sup>23</sup> La Directiva 2009/28/CE, del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de abril, relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables establece, en el anexo VII, cómo calcular la energía renovable de origen aerotérmico imputable al uso de una bomba de calor. Para el cómputo y de acuerdo con lo previsto en la Decisión 2013/114/UE, de la Comisión de 1 de marzo de 2013, por la que se establecen las directrices para el cálculo por los Estados miembros de la energía renovable procedente de las bombas de calor de diferentes tecnologías, a las bombas de calor se les exige un SCOP mínimo de 2,53. El SCOP es un coeficiente de prestación estacional, que mide la relación estimada entre la energía térmica cedida

una bomba de calor que puede ser representativa de las que se instalarán hasta el año 2030<sup>24</sup> permite, según estimaciones del fabricante, que con 1 kWh eléctrico se suministren 4,48 kWh de calor, esto es, tiene un rendimiento medio del 448% (sobre la interpretación de esta cifra, que puede llamar la atención del lector, véase el Anexo 2). A partir de las necesidades anuales de energía térmica de un hogar, y conocidas la eficiencia de la caldera de gas y la tasa de emisiones de este combustible, se calculan las cantidades de gas natural y las emisiones de CO<sub>2</sub> evitadas.

El ahorro de energía primaria anual se obtiene restando al gas natural evitado en la caldera doméstica las cantidades respectivas de gas natural y renovables utilizadas para producir la electricidad con la que se alimenta la bomba de calor. Esas cantidades se obtienen, nuevamente, teniendo en cuenta la contribución de cada tecnología al mix de generación en las horas del año en las que aumenta la demanda de electricidad como consecuencia de uso de la bomba de calor a lo largo del año de referencia y las respectivas eficiencias para convertir la electricidad en energía primaria.

Para obtener las emisiones de CO<sub>2</sub> evitadas, hay que tener en cuenta el ahorro en la caldera de gas y restar las emisiones incrementales de CO<sub>2</sub> en una central de ciclo combinado de gas necesarias para producir la electricidad que consume la bomba de calor, teniendo en cuenta las horas en las que funciona la bomba y, además, la central de ciclo combinado contribuye al mix de generación.

La energía renovable producida al año por las bombas de calor se obtiene sumando la energía captada en el exterior de la vivienda y que tiene la consideración de renovable, más la energía renovable empleada para producir la electricidad consumida por la bomba de calor. Esta cifra se calcula, nuevamente, a partir de las horas del año en las que funciona la bomba y, además, las renovables contribuyen al mix de generación.

Por último, para el coste social, hay que tener en cuenta los mismos elementos que en el aislamiento: la anualidad de la inversión y el valor de la energía eléctrica consumida en el año, menos el valor del combustible ahorrado por el hogar (gas natural) y del CO<sub>2</sub> evitado.

### **3.3 Cálculo de las restricciones medioambientales**

A continuación, se describe la forma mediante la que se incorporan las tres restricciones medioambientales al problema de minimización del coste social. Cada una de esas restricciones depende, a su vez, de la interacción de los instrumentos (todos o parte de ellos) también descritos.

---

por el sistema y la energía absorbida por el compresor. Ese valor depende de las condiciones de temperatura exterior y los fabricantes están obligados a informar a los consumidores acerca de los rendimientos del aparato que adquieren en cada zona climática. Véase el Anexo 2.

<sup>24</sup> En los cálculos que se detallan, se ha utilizado como referencia el modelo SAMSUNG WF-12ULTRA cuyos datos técnicos figuran en el Anexo 3. En un ejercicio posterior de sensibilidad se cambia este modelo.



### - La restricción de emisiones

Las emisiones de CO<sub>2</sub> imputables a la cartera definida por  $\{x_i\}_{i=1}^4$  se calculan como:

$$EMIS (\{x_i\}_{i=1}^4) = G(\Omega; x_1; x_2; x_4) + \beta_3 \cdot x_3 + \beta_4 \cdot x_4$$

donde:

- $G(\Omega; x_1; x_2; x_4)$  es la cantidad (en millones de toneladas/año) de CO<sub>2</sub> emitida en el sector eléctrico a lo largo de las 8.760 horas del año de referencia (2030), simulada con las características del *escenario objetivo* ( $\Omega$ ) del PNIEC<sup>25</sup>, pero con una cartera de instrumentos definida por  $x_1$ ,  $x_2$  y  $x_4$ . Obsérvese que  $x_3$  (viviendas aisladas térmicamente) no afecta al valor de  $G$  porque el consumo eléctrico de la vivienda no se ve afectado por una intervención de aislamiento térmico dado el supuesto de que la vivienda tiene calefacción con caldera de gas natural<sup>26</sup>.
- $\beta_3$  y  $\beta_4$  (siendo  $\beta_3 \leq 0$  y  $\beta_4 \leq 0$ ) son las reducciones anuales de las emisiones de CO<sub>2</sub> por el ahorro de consumo de gas en una caldera, asociadas respectivamente al aislamiento térmico o a la instalación de una bomba de calor en una vivienda media de 90 m<sup>2</sup>. Se miden en millones de toneladas de CO<sub>2</sub>/vivienda y año.

### - La restricción de producción renovable

La producción renovable imputable a la cartera definida por  $\{x_i\}_{i=1}^4$  se calcula como:

$$RENOV (\{x_i\}_{i=1}^4) = H(\Omega; x_1; x_2; x_4) + \delta_4 \cdot x_4$$

donde:

- $H(\Omega; x_1; x_2; x_4)$  es la cantidad (en millones de tep/año) de energía renovable producida en el sector eléctrico a lo largo de las 8.760 horas del año de referencia (2030), simulada con las características del *escenario objetivo* ( $\Omega$ ) del PNIEC, pero con una cartera de instrumentos definida por  $x_1$ ,  $x_2$  y  $x_4$ . Obsérvese que  $x_3$  (número de viviendas aisladas térmicamente) no afecta al valor de  $H$ .

---

<sup>25</sup> Nótese que, aunque el equilibrio del mercado eléctrico es único, el valor de  $F$  (en el coste social) recogía el valor del gas natural consumido y del CO<sub>2</sub> emitido en el sector eléctrico a lo largo del año, mientras que  $G$  recoge la dimensión relevante para la restricción medioambiental, que en este caso son las toneladas de emisiones de CO<sub>2</sub>.

<sup>26</sup> Como se señaló anteriormente, si bien el aislamiento térmico y el cambio a una bomba de calor no son decisiones incompatibles, sí que se asume que el hogar adoptará una u otra, pero nunca las dos simultáneamente. El motivo es que el aislamiento no resulta rentable cuando la vivienda dispone de bomba de calor, dado que la bomba de calor reduce de forma significativa el coste de la calefacción. En el mismo sentido, la rentabilidad de las bombas de calor es menor en el caso de viviendas con aislamiento térmico, por lo que es razonable actuar primero sobre las viviendas con peor aislamiento térmico (siempre que su vida útil restante sea suficiente para rentabilizar la inversión).

- $\delta_4$  (siendo  $\delta_4 \geq 0$ ) es el calor capturado anualmente en el exterior del edificio tras la instalación de una bomba de calor en una vivienda media de 90 m<sup>2</sup>. Se mide en millones de tep/vivienda y año.

#### - La restricción del consumo de energía primaria

La energía primaria consumida, imputable a la cartera definida por  $\{x_i\}_{i=1}^4$  se calcula como:

$$EPRIM (\{x_i\}_{i=1}^4) = I(\Omega; x_1; x_2; x_4) + \pi_3 \cdot x_3 + \pi_4 \cdot x_4$$

donde:

- $I(\Omega; x_1; x_2; x_4)$  es la cantidad (en millones de tep/año) de energía primaria consumida en el sector eléctrico a lo largo de las 8.760 horas del año de referencia (2030), simulada con las características del *escenario objetivo* ( $\Omega$ ) del PNIEC, pero con una cartera de instrumentos definida por  $x_1$ ,  $x_2$  y  $x_4$ . Obsérvese que  $x_3$  (número de viviendas aisladas térmicamente) no afecta al valor de  $I$ .
- $\pi_3$  y  $\pi_4$  (siendo  $\pi_3 \leq 0$  y  $\pi_4 \leq 0$ ) son, respectivamente, el ahorro de energía primaria por la reducción de consumo de gas natural en una caldera doméstica, asociado al aislamiento térmico o a la instalación de una bomba de calor en viviendas con un tamaño medio de 90 m<sup>2</sup>. Se miden en millones de tep/vivienda y año.

Por último, señalar que, para la modelización del mercado eléctrico, y en consecuencia para la obtención de los valores correspondientes a G, H e I, se ha utilizado PLEXOS como instrumento de modelización (ver Anexo 1).

### 3.4 La dimensión geográfica y el cálculo de los valores de la cartera inicial

La especificación de los parámetros para algunos de los instrumentos anteriores depende de características de tipo geográfico. Ello afecta al valor de las contribuciones unitarias de cada instrumento, tanto sobre el coste social de descarbonizar como sobre los objetivos medioambientales que se persiguen. En concreto:

- En el caso de los paneles solares fotovoltaicos, la producción anual de electricidad depende de los niveles de insolación de la zona geográfica en que se instale la planta.
- En el caso del aislamiento térmico y de la bomba de calor, los ahorros de energía dependen del consumo anual de calefacción, que varía de una zona climática a otra.
- La eficiencia de la bomba de calor es también diferente por zonas climáticas, ya que depende de la temperatura en el exterior de la vivienda.
- Por último, debe señalarse que en este análisis se ha ignorado el hecho de que muchas familias instalan la bomba de calor en sus hogares movidas por la necesidad de proporcionar refrigeración durante el verano. En consecuencia, al omitir el bienestar

derivado de ese uso, se está sobreestimando el coste incremental de inversión de la bomba para calefacción.

El PNIEC no hace un reparto geográfico de los instrumentos que se incluyen en el escenario objetivo. En este trabajo se ha introducido la dimensión geográfica en la cartera inicial de instrumentos considerando 5 zonas climáticas con niveles de insolación y de consumo de calefacción diferenciados, que quedan identificados por las siguientes ciudades: Cádiz (zona A), Valencia (zona B), Barcelona (zona C), Madrid (zona D) y Burgos (zona E)<sup>27</sup>. El Cuadro 2 resume los niveles de insolación y de consumo en calefacción por hogar en cada zona climática. Los niveles de insolación se han extraído del Real Decreto 661/2007, mientras que los consumos de calefacción por zonas climáticas se han extraído de IDAE (2012). El resto de los parámetros climáticos utilizados en los cálculos, se incluyen en el Anexo 4 de este documento.

**Cuadro 2. Niveles de insolación, consumo de calefacción por hogar y eficiencia de la bomba de calor, en el año de referencia, por zonas climáticas**

	<b>Insolación</b>	<b>Consumo de calefacción</b>	<b>Eficiencia de la bomba de calor</b>
<b>Zona A (Cádiz)</b>	1.883 horas/año	4.204 kWh <sub>calor</sub> /año	450%
<b>Zona B (Valencia)</b>	1.883 horas/año	6.412 kWh <sub>calor</sub> /año	450%
<b>Zona C (Barcelona)</b>	1.529 horas/año	8.896 kWh <sub>calor</sub> /año	450%
<b>Zona D (Madrid)</b>	1.883 horas/año	12.162 kWh <sub>calor</sub> /año	450%
<b>Zona E (Burgos)</b>	1.529 horas/año	19.660 kWh <sub>calor</sub> /año	370%
<b>Media Ponderada</b>	1.725 horas/año	8.820 kWh <sub>calor</sub> /año	448%

De la cartera inicial de cuatro instrumentos, tres de ellos (paneles solares fotovoltaicos, bomba de calor y aislamiento térmico) se han distribuido por las cinco zonas climáticas de forma proporcional a la población existente en cada una de ellas (véase Anexo 4). En el Cuadro 3 se recoge el resultado del reparto de estos tres instrumentos en la cartera inicial  $\{x_i^0\}_{i=1}^4$ .

<sup>27</sup> Las zonas climáticas son una simplificación de las recogidas en el *Anejo B* del documento del Ministerio de Fomento (2019). La simplificación consiste en que se ha asignado la totalidad de la provincia a la misma zona climática que caracteriza a su capital, aunque en la realidad en una misma provincia convivan varias zonas climáticas en función de cuál es la altitud sobre el nivel del mar. En el Anexo 5 de este documento se muestran las zonas climáticas asignadas a cada provincia. Como todo este ejercicio se realiza sobre el sistema peninsular, no se incluyen los archipiélagos ni Ceuta y Melilla. La utilización del nombre de una ciudad para cada zona solo se hace para ayudar en la interpretación.

**Cuadro 3. Reparto de instrumentos en la cartera inicial por zonas climáticas**

	Potencia Solar (MW)	Potencia Eólica (MW)	Aislamiento Térmico (miles de viviendas)	Bombas de calor (miles de viviendas)
Zona A (Cádiz)	2.537		101	17
Zona B (Valencia)	7.294		292	49
Zona C (Barcelona)	10.719		429	71
Zona D (Madrid)	8.713		349	58
Zona E (Burgos)	737		29	5
<b>España</b>		20.000		
<b>TOTAL</b>	30.000	20.000	1.200	200

Al incluir la dimensión geográfica, la contribución de los tres instrumentos considerados a la función de coste social y a los objetivos medioambientales se hace específica para cada zona climática. En consecuencia, la dimensión geográfica hace que el ejercicio realmente esté considerando 16 instrumentos ( $= (3 \times 5) + 1$ ), pues la potencia eólica no se reparte geográficamente al considerar que la producción media no difiere de forma sustancial entre las 5 zonas consideradas.

El Cuadro 4 resume las contribuciones unitarias específicas (es decir, las que no actúan a través del sector eléctrico) de cada uno de los instrumentos a cada uno de los objetivos medioambientales y a la función de costes, en cada una de las zonas climáticas.

Obsérvese que la contribución de la bomba de calor al *coste social* en las zonas C (Barcelona), D (Madrid) y E (Burgos) es negativa. Ello se debe a que el valor del gas natural y del CO<sub>2</sub> ahorrados anualmente en la caldera de gas, en las tres zonas, es superior a la respectiva anualidad de la inversión.

Obsérvese también que la contribución específica de la energía solar FV al coste social no depende de la zona climática. Ello se debe a que recoge la anualidad de la inversión más los costes anuales de O&M, que son constantes en todo el territorio.

Por último, una vez distribuida la cartera inicial de instrumentos  $\{x_i^0\}_{i=1}^4$  y conocidos los valores de las contribuciones unitarias de cada uno de ellos por zonas climáticas, es posible calcular los valores correspondientes de la función objetivo (coste social) y de cada uno de los objetivos medioambientales para esa cartera inicial que, recuérdese, viene dada por el escenario objetivo del PNIEC. El Cuadro 5 muestra los niveles correspondientes<sup>28</sup>.

<sup>28</sup> Por ejemplo,  $CS(\{x_i^0\}_{i=1}^4) = F(\Omega; x_1^0; x_2^0; x_4^0) + \sum_{i=1}^4 \alpha_i \cdot x_i^0 = 6.480$  millones de €/año.

**Cuadro 4. Contribuciones unitarias específicas<sup>29</sup> a la función de costes y a los objetivos medioambientales, por zonas climáticas**

Unidad	Zona	Panel Solar FV (1 MW)	Parque Eólico (1 MW)	Aislamiento Térmico (1 vivienda)	Bomba de Calor (1 vivienda)
Coste social ( $\alpha_i$ ) (€/unidad/año)	A			597	192
	B			576	91
	C			523	-22
	D			435	-172
	E			285	-514
	España	45.300	98.400		
Reducción de emisiones ( $\beta_i$ ) (tCO <sub>2</sub> /unidad/año)*	A			0,58	0,86
	B			0,67	1,32
	C			0,91	1,83
	D			1,31	2,50
	E			1,98	4,04
	España				
Producción renovable ( $\delta_i$ ) (tep/unidad/año)	A				0,28
	B				0,43
	C				0,59
	D				0,81
	E				1,23
	España				
Ahorro de energía primaria ( $\pi_i$ ) (tep/unidad/año)*	A			0,27	0,40
	B			0,31	0,60
	C			0,42	0,84
	D			0,60	1,14
	E			0,91	1,85
	España				

\* Las contribuciones medioambientales  $\beta$  y  $\pi$  se han expresado con valores positivos, de modo que un valor mayor refleja mayor reducción de las emisiones y del consumo de energía (esto es, mayor ahorro).

**Cuadro 5. Niveles de referencia de la función de coste social y de los objetivos medioambientales en la cartera inicial de instrumentos**

Coste social (M€/año)	Nivel de emisiones (MtCO <sub>2</sub> /año)	Producción renovable (Mtep/año)	Consumo de energía primaria (Mtep/año)
6.480	9,37	20,65	8,41

Para interpretar correctamente las magnitudes del Cuadro 5 puede ponerse el ejemplo de la producción renovable, que sería de 20,65 Mtep/año. Dada la conversión entre tep y MWh (1 tep = 11,627909 MWh), ello equivale a 240 TWh en el transcurso del año. Gran parte de esa producción vendría de las plantas de generación renovable y solo una pequeña parte de

<sup>29</sup> Por contribuciones *específicas* entendemos aquellas que no tienen lugar a través de las funciones F, G, H e I que caracterizan la función de coste social y las diferentes restricciones medioambientales. Por ese motivo, tanto la energía solar FV como la eólica carecen de contribuciones *específicas* a las restricciones medioambientales; es decir, toda su aportación se vehicula a través de las funciones G, H e I.

la producción renovable procedente de las bombas de valor. En concreto, con la distribución de bombas por zonas climáticas del Cuadro 3 y las contribuciones unitarias  $\delta$  del Cuadro 4 se obtiene una producción renovable procedente de las bombas de calor de 120.850 tep/año, equivalentes a 1,4 TWh/año.

Por su parte, el consumo de energía primaria asociado al consumo de gas en las centrales de ciclo combinado, al que se han detruido las cantidades ahorradas en el consumo de gas en los hogares por las medidas de aislamiento y de instalación de bombas de calor (en la cartera inicial) asciende a 8,41 Mtep/año. Esas cantidades consumidas de gas (netas de los ahorros) generan unas emisiones de 9,37 MTCO<sub>2</sub>/año.

Por último, el coste social de la cartera inicial es de 6.480 millones de euros por año. Recuérdese que ese coste refleja el coste anual de la inversión y de O&M en nuevos equipamientos (plantas de generación, aislamiento o bombas de calor), a los que en el caso del aislamiento y las bombas de calor se les descuentan los costes del gas y de emisiones ahorradas, más los costes del gas y emisiones inducidas en el sector eléctrico.

### 3.5. Optimización de la cartera de inicial de instrumentos

Por último, una vez caracterizada la cartera inicial en base al coste social incurrido y a los objetivos medioambientales alcanzados, se procede a su optimización. Para ello, se parte de las contribuciones medioambientales alcanzadas por dicha cartera en el escenario objetivo del PNIEC, que aparecen en el Cuadro 5. Esas contribuciones fijan las restricciones medioambientales de cumplimiento mínimo que se incorporan a un programa de optimización. En ese programa se calcula, por lo tanto, la combinación de instrumentos que, respetando el cumplimiento de dichos objetivos mínimos medioambientales, permite minimizar el coste social. El programa de optimización se resume de la siguiente forma:

$$\text{Min} \quad CS(\{x_i\}_{i=1}^4) = F(\Omega; x_1; x_2; x_4) + \sum_{i=1}^4 \alpha_i \cdot x_i$$

sujeto a:

$$G(\Omega; x_1; x_2; x_4) + \beta_3 \cdot x_3 + \beta_4 \cdot x_4 \leq 9,37 \text{ millones de ton CO}_2/\text{año}$$

$$H(\Omega; x_1; x_2; x_4) + \delta_4 \cdot x_4 \geq 20,65 \text{ millones de tep/año}$$

$$I(\Omega; x_1; x_2; x_4) + \pi_3 \cdot x_3 + \pi_4 \cdot x_4 \leq 8,41 \text{ millones de tep/año}$$

Adicionalmente, la minimización de la función objetivo se somete al cumplimiento de una condición de factibilidad para cada instrumento  $i$  en cada una de las zonas climáticas  $z$

$$0 \leq x_{iz} \leq X_{iz}$$

donde  $X_{iz}$  representa la máxima capacidad de unidades del instrumento  $i$  admisible en la zona climática  $z$ . Esa variable se determina de forma exógena en función de las características de cada zona y su objetivo es evitar que el algoritmo de optimización conduzca a niveles inalcanzables en cada instrumento y zona. En el caso de las instalaciones solares y eólicas, multiplica por diez las capacidades iniciales en cada zona climática, mientras que en el caso del aislamiento y la bomba de calor las capacidades máximas están determinadas por el parque de viviendas en cada zona. Los valores de

partida o iniciales son los que se indican en el siguiente Cuadro.

**Cuadro 6. Capacidades iniciales por instrumentos y zonas climáticas**

Zona	Solar FV (MW)	Eólica (MW)	Aislamiento Térmico (miles de viviendas)	Bomba de Calor (miles de viviendas)
A	2.537		101	17
B	7.294		292	49
C	10.719		429	71
D	8.713		349	58
E	737		29	5
<b>España</b>	30.000	20.000	1.200	200

#### 4. Resultados y discusión

Como se ha señalado con anterioridad, el programa de optimización calcula la cartera de instrumentos que permite minimizar el *coste social* de descarbonizar, respetando el cumplimiento de los objetivos medioambientales mínimos definidos por cada restricción.

**Cuadro 7. Resultados del proceso de optimización sobre cada uno de los objetivos medioambientales y sobre el coste social**

	Coste Social	Nivel Emisiones	Producción Renovable	Consumo Energía
Unidades	M€/año	MtCO <sub>2</sub> /año	Mtep/año	Mtep/año
<b>Cartera inicial</b>	6.480	9,37	20,65	8,41
<b>Cartera óptima</b>	5.774	8,85	21,34	8,41
<b>Variación</b>	-10,90%	-5,6%	3,3%	0,0%

El Cuadro 7 muestra nuevamente en la primera línea los niveles alcanzados en el coste social y los tres objetivos medioambientales en el escenario objetivo del PNIEC (ya mostrados en el Cuadro 5), mientras que en la segunda línea muestra los alcanzados tras el proceso de optimización de la cartera de instrumentos. Como puede observarse, tras la optimización el *coste social* se ha reducido casi un 11% (equivalente a 706 M€/año o 7.060 M€ a lo largo de la década 2020-2030). Por otra parte, dos de las restricciones medioambientales se cumplen con niveles que mejoran los observados en la cartera inicial; es el caso del nivel de emisiones y de la producción renovable. En consecuencia, los precios sombra de dichas restricciones son cero, esto es, alcanzarlos no implica un coste social<sup>30</sup>. En concreto, el nivel de emisiones se reduce en más de medio millón de toneladas de CO<sub>2</sub>/año y la producción de energía renovable se incrementa en 0,69 Mtep/año.

<sup>30</sup> El precio sombra de cada restricción representa el impacto que tendría, sobre la función objetivo, la variación marginal del objetivo ambiental de cada restricción. Por tanto, refleja el coste social marginal imputable a cada una de ellas.

Por el contrario, la restricción medioambiental asociada al consumo de energía primaria sí se satura; y, por tanto, su precio sombra no es nulo. Ello significa que alcanzar dicha restricción sí que conlleva un coste social y que, por tanto, reducir este objetivo medioambiental (incluso incrementando al mismo tiempo el objetivo de producción renovable y/o de emisiones) contribuiría a reducir el coste de la descarbonización y a incrementar el bienestar social.

**Cuadro 8. Resultado final del proceso de optimización de la cartera inicial sobre cada uno de los instrumentos en 2030**

	<b>Potencia Solar (MW)</b>	<b>Potencia Eólica (MW)</b>	<b>Aislamiento Térmico (hogares)</b>	<b>Bombas de Calor (hogares)</b>
<b>Cartera inicial</b>	30.000	20.000	1.200.000	200.000
<b>Cartera óptima</b>	29.000	19.678	0	1.027.841
<b>Variación</b>	-3,3%	-1,6%	-100%	414%

El Cuadro 8 muestra la cartera óptima de instrumentos que da lugar a los niveles de coste social y de resultados mostrados en el cuadro previo, una vez agregadas las zonas climáticas. Como puede observarse, el resultado del proceso de optimización indica, en relación con la cartera inicial, que la cartera óptima de instrumentos incrementa las bombas de calor en más de un 414%, reduce la potencia eólica en un 1,6%, reduce la potencia solar en un 3,3% y elimina el aislamiento térmico completamente. Como puede apreciarse, los cambios son reducidos en términos de la potencia de generación renovable a instalar, pero son sustanciales en términos de la elección óptima entre el instrumento de aislamiento y de bombas de calor.

El Cuadro 9 desagrega esos resultados por zonas climáticas en lo que respecta a las plantas solares fotovoltaicas, el aislamiento térmico de edificios y las bombas de calor. Se observa que la solución óptima conduce a los siguientes resultados:

- La instalación de 29.000 MW de paneles solares. Se trata de una cantidad ligeramente inferior a la que se proponía instalar la cartera inicial (30.000 MW). La reducción tiene lugar en las zonas climáticas C (Barcelona) y E (Burgos); por el contrario, en las zonas A (Cádiz), B (Valencia) y D (Madrid), la potencia óptima se incrementa ligeramente respecto de la inicial.
- Se instalan 19.678 MW de plantas eólicas en todo el territorio nacional, una cantidad ligeramente inferior a la que se proponía instalar la cartera inicial (20.000 MW)). La eolicidad no se ha modelizado por zonas climáticas debido a que, dentro de una misma zona climática concurren múltiples zonas con horas de viento anual diversas.
- La inversión en aislamiento térmico de hogares es expulsada de la cartera óptima en todas las zonas climáticas.



- La instalación de bombas de calor se incrementa desde 200.000 hasta 1.027.841 viviendas; y se concentra en dos zonas climáticas hasta sus respectivos máximos de factibilidad: 948.000 hogares en la zona D (Madrid) y en 80.000 hogares en la zona E (Burgos). En las zonas A, B y C no se instala ninguna bomba de calor.

**Cuadro 9. Desagregación de la cartera óptima de instrumentos, por zonas climáticas**

	Potencia Solar (MW)		Potencia Eólica (MW)	
	Óptima	Inicial	Óptima	Inicial
A (Cádiz)	2.621	2.537		
B (Valencia)	7.802	7.294		
C (Barcelona)	9.169	10.719		
D (Madrid)	8.720	8.713		
E (Burgos)	688	737		
<b>ESPAÑA</b>	29.000	30.000	19.678	20.000
	Aislamiento (miles de viviendas)		Bombas de Calor (miles de viviendas)	
	Óptima	Inicial	Óptima	Inicial
A (Cádiz)	0	101	0	17
B (Valencia)	0	292	0	49
C (Barcelona)	0	429	0	71
D (Madrid)	0	349	948	58
E (Burgos)	0	29	80	5
<b>ESPAÑA</b>	0	1.200	1.028	200

La principal conclusión es que la cartera inicial construida a partir del escenario objetivo del PNIEC ha infraponderado la bomba de calor como instrumento para alcanzar los objetivos medioambientales a mínimo coste. Al mismo tiempo, el PNIEC ha sobreponderado el aislamiento térmico de edificios. El resultado es un incremento en el coste del cumplimiento de los objetivos marcados para 2030 dentro del contexto de la lucha contra el cambio climático.

El hecho de que las pretendidas ventajas derivadas del ahorro energético asociados a los programas de rehabilitación de viviendas no se observen en la presente estimación no debe resultar sorprendente. Por ejemplo, Fowle *et al* (2015) llaman la atención sobre la enorme distancia entre esa creencia convencional y la realidad manifestada por el mayor programa residencial en Estados Unidos<sup>31</sup>. Sus resultados concluyentes al señalar, por un lado, la enorme distancia entre los ahorros previstos y los reales (del orden de 2,5 veces) y, por otro lado, cómo los costes de inversión superaron muy ampliamente los ahorros energéticos obtenidos. Además, es importante señalar que ello no fue consecuencia de “efecto rebote” alguno por un uso más intenso de la calefacción tras las medidas de mejora del aislamiento.

<sup>31</sup> Conviene enfatizar la magnitud del experimento: 7 millones de hogares, todos ellos tras pasar por un test coste-beneficio basado en estimaciones ingenieriles, reciben una media de 5.150 \$ para aislamiento térmico de paredes y techos, reducción de infiltraciones y reemplazamiento de electrodomésticos.

En suma, los autores obtienen una tasa de retorno cercana al -10%, incluso cuando se consideran los beneficios sociales (menores emisiones) por el menor consumo energético. Esto indica que realmente la falta de inversión en la rehabilitación energética de viviendas podría no ser fruto, como reiteradamente se señala, de la presencia de fallos de mercado (por ejemplo, asimetrías de información, mercados de capitales imperfectos, incentivos de grupo...) que hace que los individuos no vean o no puedan actuar conforme a una estrategia racional de inversión en ganancias de eficiencia. Por el contrario, los resultados obtenidos por Fowle *et al* (2015) señalan precisamente que esa reticencia a actuar es coherente con la inexistencia de tales ganancias.

Por último, el ejercicio anterior se ha sometido a un contraste de sensibilidad con dos bombas de calor distintas a la inicialmente contemplada. En el primer bloque del Cuadro 10 se muestran los resultados para una bomba DAIKIN TXA20AW, que es un modelo más eficiente (mayor SCOP) que el contemplado inicialmente. Como puede observarse, los resultados no difieren de modo significativo de los alcanzados previamente. La comparación de la cartera óptima frente a la cartera inicial resultante del escenario objetivo del PNIEC indica la ventaja relativa de la bomba de calor, que en este caso aumenta su instalación con respecto al ejercicio previo. Ello redundará en una mayor reducción del coste social y de las emisiones, al mismo tiempo que un mayor aumento de la producción renovable, sin que, como antes, se modifique el nivel de energía primaria consumida. En el bloque central del Cuadro 10 se repiten los resultados obtenidos con anterioridad con el fin de facilitar la comparativa.

Por último, en el bloque de la derecha del Cuadro 10 se introducen los resultados de un ejercicio en el que la solución tecnológica no es la de una bomba aire-aire, como anteriormente, sino una bomba DAIKIN aire-agua. Como puede comprobarse, en términos globales se trata de una solución menos eficiente que las anteriores. Por un lado, la reducción del coste social es menos intensa, la ganancia de generación renovable es inferior, y se satura (es decir, no es posible reducir) la restricción de emisiones de CO<sub>2</sub>. La única ventaja con respecto a las soluciones aire-aire sería la de una ligera reducción del consumo de energía primaria con respecto a las obtenidas en la situación de partida con la cartera inicial.

**Cuadro 10. Análisis de sensibilidad con otras soluciones en bombas de calor**

		SAMSUNG aire-aire			DAIKIN aire-aire			DAIKIN aire-agua		
		Cartera			Cartera			Cartera		
		Inicial	Óptima	Δ	Inicial	Óptima	Δ	Inicial	Óptima	Δ
<b>Coste Social</b>	M€/año	6.480	5.774	-706	6.475	5.656	-819	6.618	6.189	-429
<b>Emisiones CO<sub>2</sub></b>	MtCO <sub>2</sub> /año	9,4	8,9	-0,5	9,4	8,4	-1,0	9,4	9,4	0,0
<b>E. Renovable</b>	Mtep/año	20,7	31,3	10,7	20,7	21,6	0,9	20,6	20,9	0,3
<b>E. Primaria</b>	Mtep/año	8,4	8,4	0,0	8,4	8,4	0,0	8,4	8,3	-0,1
<b>Potencia Solar</b>	GW	30	29,0	-1,0	30	28,3	-1,7	30,0	28,4	-1,6
<b>Potencia Eólica</b>	GW	20	19,7	-0,3	20	19	-1,0	20	22	2,0
<b>Aislamiento T.</b>	M viviendas	1,2	0,0	-1,2	1,2	0,0	-1,2	1,2	0,0	-1,2
<b>Bombas de Calor</b>	M viviendas	0,2	1,0	0,8	0,2	1,3	1,1	0,2	0,4	0,2

## 5. Conclusiones

En este trabajo se propone e ilustra una metodología que permite identificar la cartera óptima de instrumentos para avanzar en la descarbonización de la actividad económica. El objetivo que se plantea es minimizar el coste social vinculado a esa cartera de instrumentos, dados los objetivos medioambientales asumidos por España relativos a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, al aumento de la penetración de energías renovables y a la reducción (ahorro) del consumo energético. El ejercicio de optimización se desarrolla sobre el escenario que, en el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima, ya figura como escenario objetivo para España en el año 2030.

Debe enfatizarse que es un ejercicio que no se plantea si los objetivos medioambientales debieran ser distintos a los ya aprobados, sino solo cómo reducir los costes sociales globales asociados a los instrumentos analizados mejorando al mismo tiempo (o en ningún caso empeorando) los resultados medioambientales. En todo caso, los resultados del análisis también permiten extraer conclusiones respecto de cómo optimizar el bienestar social modificando los objetivos incluidos en el PNIEC.

El trabajo permite poner de manifiesto la necesidad de evaluar las decisiones de inversión, y por supuesto las decisiones sobre las subvenciones públicas que se puedan otorgar para apoyar esa inversión, máxime cuando hay instrumentos alternativos para conseguir los fines medioambientales perseguidos con un coste sustancialmente menor. Se trata de un requerimiento básico, no satisfecho ni en el PNIEC ni en la justificación de los fondos de reconstrucción del Plan Nacional de Recuperación y Resiliencia.

Aunque la principal aportación del trabajo sea de carácter metodológico, el ejercicio realizado permite obtener una conclusión de gran interés: es posible modificar las cuantías en la cartera de instrumentos propuestos en el PNIEC para reducir el coste de cumplimiento y, con ello, liberar recursos con los cuales mejorar el bienestar social.

En particular, en este trabajo se ha analizado una cartera con cuatro instrumentos. El resultado más destacado es que, en la elección entre avanzar en la electrificación de los hogares a través de la sustitución de la calefacción con gas mediante la bomba de calor, o bien apostar por seguir conservando la calefacción por gas y reducir el consumo mediante medidas de aislamiento térmico, la primera de las alternativas resulta ser mucho más eficiente. El ejercicio realizado, para el que fundamentalmente se ha utilizado información del PNIEC y estimaciones del IDAE, indica que la bomba de calor desplaza claramente a la solución de aislamiento térmico. Por tanto, desde el punto de vista del cumplimiento de los objetivos medioambientales con el mínimo coste para los consumidores, se deberían reconsiderar los objetivos de aislamiento de viviendas y de bombas de calor planteados en el PNIEC para el parque de viviendas ya construidas en el sentido de minimizar los primeros y maximizar los segundos. Los parámetros incluidos en la modelización están siempre sujetos a incertidumbres y, seguramente merecerían un mayor esfuerzo de validación empírica. Sin embargo, la conclusión que aquí se obtiene es nítida y no se modifica ante variaciones razonables de dichos parámetros.

Hay, además, un argumento adicional muy relevante para esa reorientación que no se ha tenido en cuenta en el ejercicio realizado ya que este solo contempla la situación óptima, pero estática para el año 2030 (año de referencia en el PNIEC). Sin embargo, no debe

olvidarse que el año 2030 es solo un año de transición hacia el objetivo de largo plazo, situado en 2050, en el que debe lograrse un balance neto nulo de emisiones de gases de efecto invernadero. El largo plazo requiere la descarbonización total de los consumos energéticos de los hogares, lo que solo es posible mediante el cambio de fuente energética hacia una fuente descarbonizada, como lo será la electricidad.

Esto significa, en primer lugar, que el aislamiento térmico de edificios no evitará tener que instalar bombas de calor. Por ello, en la medida en que se invierta (y se subvencionen) soluciones de corto plazo que no favorecen la descarbonización total del consumo energético en el largo plazo (tales como las inversiones y subvenciones para la renovación de las calderas de gas), esas inversiones (y subvenciones) van a encarecer la transición energética de los hogares.

En segundo lugar, significa que el análisis de la rentabilidad del aislamiento térmico no debe hacerse teniendo en cuenta únicamente el actual sistema de calefacción de las viviendas, sino teniendo en cuenta que a medio plazo las viviendas deberán disponer necesariamente de bombas de calor, lo cual reducirá sustancialmente el consumo y el ahorro que se obtendrá por el aislamiento. Por otra parte, el análisis se ha efectuado con bombas de calor aire-aire, ya que el coste de los sistemas aire-agua (suelo radiante) resulta prohibitivo a menos que se efectúe en el contexto de viviendas nuevas o grandes reformas. Por ello, sería conveniente exigir la preinstalación de suelos radiantes con bomba de calor en caso de nuevas viviendas o grandes reformas. Dado que las grandes reformas se acometen, en media, cada 30 años, es necesario imponer esa exigencia *desde ahora* para llegar al año 2050 con un parque de viviendas adaptado, que permita cubrir las necesidades de calor de los hogares sin emisiones y sin comprometer el confort.

Todo este planteamiento es coherente con la revisión en curso de la Directiva de Eficiencia Energética en Edificios, que en su considerando 14 señala que los “*Estados Miembros deben indicar sus políticas y medidas nacionales para poner término al uso de energías fósiles en la calefacción y refrigeración en los planes de renovación residenciales, y no proveer incentivos financieros a la instalación de calderas con combustibles fósiles más allá de 2027*”.

Otra conclusión del análisis es que, de los tres objetivos ambientales (referidos al ahorro de energía, el porcentaje de energía de origen renovable, y las emisiones de gases de efecto invernadero) solamente la restricción medioambiental asociada al consumo de energía primaria se satura. En el caso de los otros dos objetivos, no solamente se cumplen las restricciones, sino que se superan (en la solución de mínimo coste, la energía renovable alcanza un nivel superior al de la cartera inicial y las emisiones de CO<sub>2</sub>, un nivel inferior). La Comisión Europea no exige que los países se fijen metas ambiciosas en todos y cada uno de los objetivos ambientales. Por otra parte, resulta evidente que España tiene una ventaja comparativa con respecto a los países del norte de Europa en el aprovechamiento de las energías renovables, dada la mayor abundancia de recursos, y una desventaja con respecto a esos mismos países en la reducción del consumo de energía primaria (por ejemplo, mediante aislamiento térmico de edificios), ya que en los países del norte de Europa el mismo gasto en aislamiento redundará en un mayor ahorro en el consumo de energía. Esto significa que, a la hora de fijar objetivos, España debería ser más ambiciosa que la media de la Unión Europea en cuanto al aprovechamiento de las energías renovables y la reducción

de emisiones de CO<sub>2</sub>, pero con objetivos menos exigentes que la media en cuanto al ahorro de energía primaria.

De hecho, lo que en el ejercicio desarrollado determina el coste del cumplimiento de los objetivos es, única y exclusivamente, el ahorro de energía primaria. Con respecto a los objetivos del PNIEC, se podría reducir el nivel de ambición en cuanto al ahorro de energía primaria y compensarlo incrementando el nivel de ambición en emisiones de CO<sub>2</sub> y aprovechamiento de energía renovable y, a pesar de ello, se reduciría el coste de cumplimiento de los tres objetivos. Como se ha mencionado, de los tres objetivos medioambientales solamente la restricción asociada al consumo de energía primaria se satura.

En cualquier caso, las Instituciones Europeas deberían ser conscientes de que en la lucha contra el cambio climático el único objetivo relevante es el de reducción de emisiones, siendo el resto meramente objetivos instrumentales. No tiene sentido imponer objetivos que puedan actuar limitando las posibilidades de descarbonización del modo más eficiente posible, pues en ese caso la mejor solución es evitar esa restricción eliminando el objetivo. A su vez, en tanto que la norma europea obligue a tener en cuenta esos objetivos instrumentales, los Estados Miembros deben aprovechar toda la flexibilidad que la propia norma permite para maximizar los esfuerzos en la reducción de emisiones.

No obstante, hay que tener en cuenta que, en ausencia de impuestos y subvenciones que no internalicen externalidades y que por tanto distorsionen las señales de precios, gran parte de los instrumentos de descarbonización serían rentables y, en consecuencia, serían acometidos directamente por los agentes económicos. Esto haría prescindible el uso de las subvenciones, con la consiguiente liberación de recursos públicos para otros fines.

En este sentido, es relevante que el análisis que aquí se ha realizado se basa en la minimización del coste social y, por tanto, no tiene en cuenta las distorsiones que la fiscalidad ejerce sobre las decisiones adoptadas por los agentes económicos. En ese sentido, como se señaló en el Informe de la Comisión de Expertos sobre Escenarios de Transición Energética (véase Sanz y Rodríguez, 2019), la forma óptima de promover la descarbonización a mínimo coste no es mediante subvenciones indiscriminadas, sino mediante una reforma fiscal medioambiental en el sector energético que evite distorsiones en los precios relativos de las distintas energías. Si los precios incorporan correctamente los costes sociales, entonces los agentes desarrollarán inversiones privadas alineadas con la minimización del coste social.

Por último, hay una cuestión adicional que subyace en el debate sobre el uso de los fondos europeos, y es el deseo de que se utilicen para lograr un efecto anti-cíclico e impulsar la actividad económica y el empleo. Obviamente, la creación de empleo es un objetivo legítimo de política económica. Sin embargo, ello no significa que deban usarse los fondos destinados a la lucha contra el cambio climático con el objetivo de crear empleo. Primero, el hecho de distraer recursos destinados a la lucha contra el cambio climático para crear empleo reducirá la efectividad de las políticas de lucha contra el cambio climático, y ello requerirá disponer de más fondos para cumplir con los objetivos. Ese incremento en los costes, supuestamente para la lucha contra el cambio climático, corre el riesgo de provocar un rechazo social que podría poner en riesgo el cumplimiento de los objetivos. Segundo, se

debería valorar cuántos puestos de trabajo adicionales se crearían por seguir políticas que no son de mínimo coste, y evaluar el coste adicional en el que se incurre por cada puesto de trabajo adicional creado. De este modo se podría determinar si realmente la creación de puestos de trabajo mediante la distracción de recursos destinados para la lucha contra el cambio climático es la forma más eficiente de crear puestos de trabajo o de ayudar a los hogares en pobreza o riesgo de pobreza (versus, por ejemplo, destinar ese dinero para ayudas directas a las familias vulnerables).

En cualquier caso, debe recordarse que el análisis aquí realizado no se refiere a la renovación residencial, sino específicamente al aislamiento térmico de edificios frente a una medida alternativa. La renovación es un concepto muy amplio que, en muchas ocasiones, incorpora mejoras de habitabilidad con independencia de su efecto energético. Un ejemplo puede ser ilustrativo: instalar un ascensor en un edificio antiguo que no dispone del mismo no tiene como objetivo aumentar el ahorro energético (de hecho, aumenta el consumo eléctrico), sino mejorar el confort de los residentes. La justificación del apoyo público a ese tipo de medidas, u otras similares, puede ser perfectamente válida pero no es objeto de tratamiento ni análisis en este estudio.

En definitiva, el análisis que se ha llevado a cabo en este trabajo parte de una premisa: hay un objetivo de largo plazo que es la descarbonización de la actividad y, por tanto, el uso de los fondos que tengan esa finalidad debe hacerse del modo más eficiente posible en la consecución de ese objetivo. En cualquier caso, no debe pensarse que unas soluciones de inversión tienen efectos sobre el empleo y otras no. Obviamente, la rehabilitación de viviendas crea empleo, pero también se crea empleo en la construcción de nuevas plantas de generación renovable, en la industria de bienes de equipo y componentes y en las actividades de instalación de nuevos equipamientos térmicos en los hogares (Rodríguez, 2021). Pero, de nuevo, siendo deseable ese efecto tractor, las consideraciones sobre el empleo (y su calidad) no deben ser el objetivo de las políticas de descarbonización.

## Referencias

- ENTSO-E (2020). Ten-Year Network Development Plan Scenario Report 2020. Disponible en: <https://2020.entsos-tyndp-scenarios.eu/>
- EUROSTAT (2019). Energy Balance Sheets, 2017 data.
- Fowle, M., Greenstone, M. y Wolfram, C. (2015). Do Energy Efficiency Investments Deliver? Evidence From The Weatherization Assistance Program. *NBER Working Paper 21331*.
- IDAE (2012). Guía del IDAE sobre Sistemas de Aislamiento Térmico Exterior (SATE) para la Rehabilitación de la Envolvente Térmica de los Edificios. Disponible en: [https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos\\_12300\\_Guia\\_SATE\\_A2012\\_accesiblesedan\\_df06746b.pdf](https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_12300_Guia_SATE_A2012_accesiblesedan_df06746b.pdf)
- IDAE (2014). Prestaciones medias estacionales de las bombas de calor para producción de calor en edificios. Disponible en: [https://energia.gob.es/desarrollo/EficienciaEnergetica/RITE/Reconocidos/Reconocidos/Otros%20documentos/Prestaciones\\_Medias\\_Estacionales.pdf](https://energia.gob.es/desarrollo/EficienciaEnergetica/RITE/Reconocidos/Reconocidos/Otros%20documentos/Prestaciones_Medias_Estacionales.pdf)
- IDAE (2019a). Síntesis del Estudio Parque de Bombas de Calor en España, Estudios 001. Disponible en: [https://www.idae.es/sites/default/files/documentos/publicaciones\\_idae/bombas\\_de\\_calor\\_correccion\\_errata\\_febrero\\_2019.pdf](https://www.idae.es/sites/default/files/documentos/publicaciones_idae/bombas_de_calor_correccion_errata_febrero_2019.pdf)
- IDAE (2019b). Estudio SPAHOUSEC II. Análisis estadístico del consumo de gas natural en las viviendas principales con calefacción individual. Estudios IDAE 005. Disponible en: [https://www.idae.es/sites/default/files/documentos/publicaciones\\_idae/estudio\\_spahousec-ii\\_270619.pdf](https://www.idae.es/sites/default/files/documentos/publicaciones_idae/estudio_spahousec-ii_270619.pdf)
- Ministerio de Fomento (2019). Documento BásicoHE. Ahorro de energía.
- Rodríguez, A. (2019). Evolución de los objetivos sobre eficiencia energética en España y perspectivas futuras. *Cuadernos de Energía* 61, p. 45-52.
- Rodríguez, D. (2021). Industria y transición energética. *ICE Revista de Economía* 919, p. 83-103.
- Sanz, J y Rodríguez, D. (2019). El PNIEC y su principal reto pendiente: la reforma fiscal medioambiental, Fedea Policy Papers 2019/03.
- Steffen, B. (2020). Estimating the cost of capital for renewable energy projects. *Energy Economics* 88, 104783.

## Anexo 1. La modelización del sector eléctrico

Como es bien sabido, la generación y venta de energía eléctrica se canaliza a través de un mercado organizado e integrado para un amplio número de países europeos, entre ellos el mercado ibérico de electricidad (MIBEL). La realización del ejercicio de optimización que se realiza en este trabajo requiere incorporar una modelización del equilibrio en el sector eléctrico, pues a través de él los cambios en cualquiera de tres de los instrumentos considerados (fotovoltaica, eólica y bombas de calor) afectan a la totalidad de los agentes (consumidores y generadores) que participan en el mercado. No es ese el caso para el aislamiento térmico de una vivienda con calefacción térmica (por ejemplo, de gas natural) ya que el aislamiento reduce el consumo de dicho combustible, pero no afecta al consumo de electricidad y, por tanto, no afecta al sistema eléctrico.

Así, por ejemplo, la instalación de capacidad eólica adicional supone la aportación al mercado eléctrico, en cada una de las horas en las que la nueva capacidad inyecta a la red, de energía libre de emisiones que, excepto en situaciones de “vertidos de renovables” desplaza la producción de la tecnología de origen térmico (generalmente gas natural) de tal modo que se reducen el consumo de energía primaria y las emisiones.

La instalación de bombas de calor, a su vez, ocasiona un aumento de la demanda de electricidad en las horas en que estas se utilizan. Ello puede tener el efecto contrario al anterior, es decir, favorecer una mayor producción eléctrica que inicialmente se hará generalmente con ciclos combinados pero que inducirán una mayor entrada de instalaciones que usan energías renovables.

En consecuencia, la interacción de estos tres instrumentos en el sector eléctrico modifica la capacidad de cada uno de ellos de hacer aportaciones a cada uno de los objetivos medioambientales, lo que exige calcular la contribución de la cartera de instrumentos a la función de coste (F) y a cada una de las restricciones medioambientales (G, H e I) a través de una modelización conjunta del mercado eléctrico a medida que el algoritmo de optimización va modificando la cartera de instrumentos.

Para ello, se requiere la utilización de un modelo de simulación que integre las características técnicas y económicas de los agentes que participan en el mercado eléctrico a lo largo de las 8.760 horas del año. En concreto, para simular los sistemas eléctricos español y portugués se ha utilizado un modelo basado en PLEXOS. PLEXOS es un programa de carácter comercial, propiedad de *Energy Exemplar*, que permite la optimización de sistemas eléctricos y que es ampliamente utilizado por empresas y operadores de sistemas eléctricos. En particular, Plexos fue el programa utilizado por Red Eléctrica de España en la modelización del sistema eléctrico para el PNIEC (véase Anexo B.1.2 del PNIEC).

El modelo tiene en cuenta las condiciones del *escenario objetivo* del PNIEC español en 2030 junto con el mercado eléctrico portugués. Esas condiciones se refieren principalmente a la demanda, capacidades de generación, costes de combustibles e interconexión.

El modelo permite estimar los datos requeridos (consumo de gas, emisiones y precios horarios) en respuesta a variaciones concretas de cada uno de los instrumentos considerados en el análisis, obteniendo los valores de F, G H e I asociados a cada cartera de instrumentos  $\{x_i\}_{i=1}^4$  en cada una de las iteraciones del algoritmo de optimización.

Dado que PLEXOS es una herramienta externa al modelo de minimización de costes (aunque este utiliza sus resultados en la optimización), y con el objeto de simplificar el procedimiento, se ha realizado un número acotado de simulaciones del mercado eléctrico en equilibrio, permutando múltiples combinaciones de cada uno de los tres instrumentos de la cartera que intervienen en el sector eléctrico (generaciones eólica y solar FV y bomba de calor), e interpolando los valores que resultan de cambios intermedios.



## Anexo 2. Bomba de calor: descripción y cálculo del incremento de demanda eléctrica asociado a su instalación

La bomba de calor transfiere calor desde un foco frío (ambiente exterior) a un foco caliente (interior de la vivienda) mediante una aportación de trabajo en forma de energía eléctrica. Ese flujo contrario al natural (desde el foco caliente al frío) se logra por el funcionamiento de un motor que eleva la presión y calienta un fluido refrigerante (en forma de gas). Ese calor se cede al foco caliente mediante un condensador, enfriándose y expandiéndose posteriormente mediante una válvula de expansión. El fluido, ya en forma líquida, vuelve a pasar por la fuente fría, volviendo a evaporarse absorbiendo calor y reiniciándose el ciclo en el motor de compresión. La transmisión de calor puede ser desde distintos medios exteriores (aire, agua, tierra) a distintos medios interiores. De ahí que se hable de bomba de calor aire-aire, tierra-aire, aire-agua, etc. En este trabajo se evalúa una bomba aire-aire por ser, con diferencia, la más frecuente en construcciones ya existentes. Sin embargo, las nuevas construcciones suelen tener ya incorporadas bombas de calor aire-agua (suelo radiante). Además, en la inmensa mayoría de los casos las bombas de calor suelen ser reversibles, ya que el funcionamiento del gas en sentido contrario permite aportar frío en lugar de calor.

Es importante señalar que una parte importante de la energía térmica aportada por la bomba de calor proviene del exterior. Esa energía del exterior se considera renovable, dado que no utiliza ningún input agotable. El hecho de que una parte importante de la energía térmica resultante no haya sido generada mediante un motor sino captada en el exterior y trasladada al interior hace que la bomba de calor sea muy eficiente energéticamente. Esa relación entre la energía total cedida por el sistema (generada + trasladada) y la energía utilizada por el compresor, evaluada en determinadas condiciones de temperatura que varían por estaciones, es el índice SCOP (Seasonal Coefficient Of Performance) que, debido a lo señalado anteriormente, tiene valores superiores a 1 (o 100%). Por ejemplo, un índice SCOP=5 (o 500%) indica que solo una quinta parte de la energía necesaria para climatizar una vivienda proviene de la energía eléctrica consumida, mientras que el resto proviene de la energía aprovechada del exterior.

El incremento de demanda eléctrica ( $DE_t^z$ ) en la hora  $t$  del año vinculada a la instalación de una bomba de calor (que sustituye a una caldera de gas) en un hogar medio español de 90 m<sup>2</sup> de una zona climática  $z$ , se obtiene dividiendo la demanda de calor para calefacción en dicha hora  $t$  y en dicha zona climática  $z$  ( $DC_t^z$ ) por la eficiencia de la bomba de calor en la zona climática ( $SCOP^z$ ):

$$CE_t^z = \frac{DC_t^z}{SCOP^z}$$

Por su parte, la demanda de calor para calefacción en la hora  $t$  y en la zona climática  $z$  ( $DC_t^z$ ), se calcula siguiendo la siguiente expresión:

$$DC_t^z = DC^z \cdot \frac{\Delta T_t^z}{\sum_{t=1}^{365} \Delta T_t^z} \cdot \eta_h$$

Siendo:

$DC^z$  = demanda anual de calor para calefacción en la zona  $z$  (ver valores en Cuadro 2)

$$\Delta T_t^z = \begin{cases} (17^\circ - Temp_t^z) & \text{si } (17^\circ - Temp_t^z) \geq 0 \\ 0 & \text{si } (17^\circ - Temp_t^z) < 0 \end{cases}$$

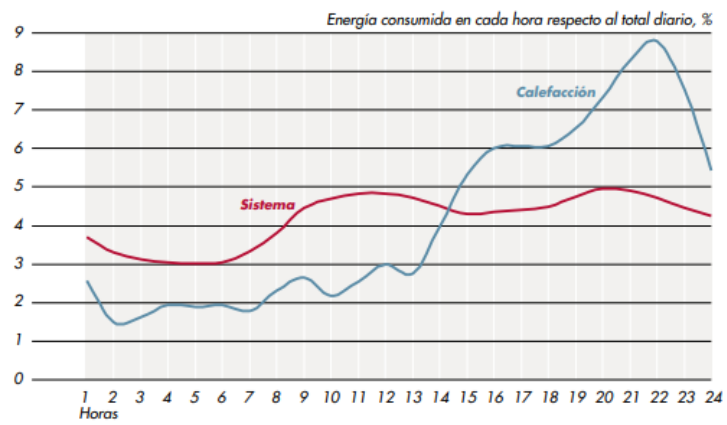
$Temp_t^z$  = temperatura media del día  $t$  en la zona  $z$

17° es la temperatura considerada “de confort” y, por debajo de la cual, se activa el uso de la calefacción en la vivienda.

$\eta_h$  = perfil horario de distribución de la demanda de calor a lo largo del día ( $\sum_{h=1}^{24} \eta_h = 1$ )

Los valores de  $\eta_h$  se han obtenido del *Proyecto INDEL, Atlas de la demanda eléctrica española, página 70*; y sus valores se reproducen en la siguiente ilustración:

**Ilustración 1. Perfil horario de consumo de calefacción en un hogar medio español.**



Fuente: Red Eléctrica de España: *Proyecto INDEL, Atlas de la demanda eléctrica española, página 70*

### Anexo 3. Parámetros técnicos de los instrumentos de descarbonización

#### Instalaciones Solares (centralizadas)

Unidad de Referencia:	1 MW
Coste de Inversión:	500.000 €/MW (Incluye instalación)
Vida Útil:	30 años
Coste de O&M:	9.000 €/MW y año
Disponibilidad del recurso:	La correspondiente a cada zona climática.
Ratio $E_p/E_f$ :	1 $MWh_p/MWh_f$ para convertir la energía final ( $MWh_f$ ) en primaria ( $MWh_p$ ) en las instalaciones renovables

#### Instalaciones Eólicas

Unidad de Referencia:	1 MW
Coste de Inversión:	1.066.000 €/MW (Incluye instalación)
Vida Útil:	20 años
Coste de O&M:	21.000 €/MW y año
Disponibilidad del recurso:	2.100 horas/año
Ratio $E_p/E_f^{32}$ :	1 $MWh_p/MWh_f$ para convertir la energía final ( $kWh_f$ ) en primaria ( $kWh_p$ ) en las instalaciones renovables

#### Aislamiento Térmico de Edificios

Unidad de Referencia:	aislamiento tipo SATe en un hogar de 92 m <sup>2</sup> , en bloque de viviendas construido en 1975
Coste de Inversión:	10.000 €/hogar (aislamiento total <sup>33</sup> )
Vida útil:	30 años

#### Bomba de Calor Aire-Aire (Opción más eficiente)

Unidad de Referencia:	Modelo DAIKIN TXA20AW de 3,5 kWt de potencia térmica (0,9 kW de potencia eléctrica), con 4 splits (dimensionado para calentar un hogar de 92 m <sup>2</sup> )
Coste de Inversión:	797 €/unidad
Vida útil:	15 años
SCOP a 2°C:	6,26
SCOP a -10°C:	5,15

---

<sup>32</sup>  $E_p/E_f$  = energía primaria/energía final.

<sup>33</sup> Aislamiento de fachadas -huecos incluidos-, más tejados.

### **Bomba de Calor Aire-Aire (Opción menos eficiente)**

Unidad de Referencia:	Modelo SAMSUNG WF-12ULTRA de 4 kWt de potencia térmica (1 kW de potencia eléctrica), con 4 splits (dimensionado para calentar un hogar de 92 m <sup>2</sup> )
Coste de Inversión:	849 €/unidad
Vida útil:	15 años
SCOP a 2°C:	4,48
SCOP a -10°C:	3,70

### **Caldera de Gas Natural medida en PCS (Poder Calorífico Superior)**

Eficiencia:	98%
Tasa de Emisión:	0,201 tCO <sub>2</sub> /MWh = 2,34 tCO <sub>2</sub> /tep * 0,086 tep/MWh)

### **Centrales de Generación de Ciclo Combinado (CCGT)**

Eficiencia:	2,09 kWh <sub>gas</sub> /kWh <sub>elec</sub> , medida en el punto de consumo <sup>34</sup>
Tasa de Emisión:	0,41 tCO <sub>2</sub> /MWh <sub>e</sub> (en barras de central e incluyendo la pérdida de eficiencia asociada a los costes de arranque de las centrales)

*Fuentes:* Para las instalaciones fotovoltaicas y solares: escenarios NT (National Trends) y DE (Distributed Energy) de ENTSO-E (2020). Para el aislamiento térmico: IDAE (2012). Para las bombas de calor: referencias técnicas de los fabricantes. Para caldera de gas natural: IDAE (2012). Para centrales de generación de ciclo combinado: Red Eléctrica de España.

---

<sup>34</sup> Aunque habitualmente se mide la eficiencia en el punto de salida de la subestación (barras de central), en este informe tiene sentido medirla en el punto de consumo. En ese caso la eficiencia es menor (mayores necesidades de kWh de gas para producir un kWh de electricidad) porque hay que añadir las pérdidas por el transporte y distribución de esa energía.

#### Anexo 4. Parámetros por zonas climáticas

	Unidades	España	A3 Cádiz	B3 Valencia	C2 Barcelona	D3 Madrid	E1 Burgos
<b>Población</b>							
Habitantes	millones	43,5	3,7	10,6	15,5	12,6	1,1
Reparto por zonas	porcentaje	100%	8,46%	24,31%	35,73%	29,04%	2,46%
<b>Demanda de calor sin aislamiento</b>							
	kWh/hogar y año	8.820	4.204	6.412	8.896	12.162	19.660
<b>Aislamiento total</b>							
Ahorro de calor	%	53%	68%	51%	50%	52%	49%
<b>Bomba de calor aire-aire marca DAIKIN</b>							
SCOP calefacción	#	6,2	6,3	6,3	6,3	6,3	5,2
<b>Bomba de calor aire-aire marca SAMSUNG</b>							
SCOP calefacción	#	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	3,7
<b>Bomba de calor aire-agua marca DAIKIN</b>							
SCOP calefacción	#	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	3,5

#### Anexo 5. Asignación de zonas climáticas por provincias

Provincia	Zona climática	Provincia	Zona climática
Albacete	D	León	E
Alicante	B	Lleida	D
Almería	A	Lugo	D
Araba/Álava	D	Madrid	D
Asturias	C	Málaga	A
Ávila	E	Murcia	B
Badajoz	C	Navarra	D
Baleares, Islas	-	Ourense	C
Barcelona	C	Palencia	D
Bizkaia	C	Palmas, Las	-
Burgos	E	Pontevedra	C
Cáceres	C	Rioja, La	D
Cádiz	A	Salamanca	D
Cantabria	C	Santa Cruz de Tenerife	-
Castellón	B	Segovia	D
Ciudad Real	D	Sevilla	B
Córdoba	B	Soria	E
Coruña, La	C	Tarragona	B

Cuenca	D	Teruel	D
Guipuzcoa	C	Toledo	C
Girona	C	Valencia	B
Granada	C	Valladolid	D
Guadalajara	D	Zamora	D
Huelva	B	Zaragoza	D
Huesca	D	Ceuta	-
Jaén	C	Melilla	-

---