





imagen

Solar PS10 es una planta de 11 MW  
que produce electricidad con 624  
helióstatos de gran tamaño.

© MARKEL REDONDO / GREENPEACE

---

# Planteamientos conceptuales

---

# 2

En este punto recogemos y elaboramos algunos de los conceptos que subyacen en el planteamiento de los escenarios y análisis desarrollados en este informe.

## 2.1 Sobre los límites del crecimiento

Un indicador fundamental de nuestro sistema económico es el Producto Interior Bruto (PIB)<sup>18</sup>. Con la estructura actual de nuestro sistema económico, se considera una condición fundamental para la “salud” del sistema económico que se mantengan valores positivos del crecimiento anual del PIB<sup>19</sup>. Es decir, nuestro sistema económico no funciona correctamente si no se mantienen unas condiciones de crecimiento continuado del PIB.

Sin embargo, con la estructura actual de nuestro sistema económico<sup>20</sup>, esta condición de crecimiento mantenido entra claramente en conflicto con las condiciones de contorno a las que se debe someter la actividad de nuestra sociedad mientras se limite al planeta Tierra. Es decir, la “salud” de nuestro sistema económico y la de nuestro planeta no puede coexistir, lo cual, sin duda, representa un grave problema además de un evidente signo de insostenibilidad. En efecto, la condición de mantener una tasa de crecimiento porcentual anual constante a lo largo del tiempo, matemáticamente equivale a tener un crecimiento exponencial del PIB con el tiempo, y en el contexto actual de nuestro sistema económico resulta incompatible mantener un crecimiento exponencial en un medio finito (planeta Tierra). En algún momento ese crecimiento exponencial conduce a alcanzar la capacidad de carga del planeta, y dada la inercia del sistema económico incluso nos lleva a sobrepasar esa capacidad de carga para sobreexplotar el medio<sup>21</sup>: la consecuencia, en cualquier

sistema ecológico donde se dan estas condiciones, es una situación de crisis aguda que conduce al exterminio de una gran parte de la población y a una gran reducción de la capacidad de carga del medio, para soportar una población muy inferior de esa especie.

La estructura actual de nuestro sistema económico se basa en la producción y venta de bienes de consumo, lo cual conduce a situaciones de gran ineficiencia, y limita mucho o incluso imposibilita su capacidad de reacción en situaciones de crisis. En efecto, el hecho de que la “salud” del sistema económico esté directamente relacionada con la venta de productos (coches, casas, etc.), en lugar de con la cobertura de los servicios que el usuario quiere satisfacer con esos productos (accesibilidad, confort, etc.) elimina del sistema las principales señales que permiten cubrir esos servicios de forma eficiente, y a menudo nos conducen a una situación de ineficiencia absoluta.

Consideremos por ejemplo el sector transporte particular. Actualmente en España tenemos ya demasiados vehículos que circulan y congestionan las infraestructuras viarias (del orden de ½ vehículo particular por habitante), lo cual, dada la baja eficiencia de estos vehículos, constituye uno de los principales problemas desde el punto de vista de las emisiones de GEI. La evolución del sistema transporte hacia la eficiencia requiere precisamente lo contrario a mantener esos niveles de ventas de vehículos, es decir, lo que requiere es usar los vehículos con factores de capacidad mucho más elevados a los actuales. Y las señales adecuadas del sistema económico, para evolucionar hacia la eficiencia, deberían ser que el beneficio de los fabricantes de vehículos estuviera directamente vinculado a la eficiencia de los vehículos, y no a la cantidad de los mismos vendidos, como sucede en la actualidad. Pero en el contexto

**18** Con la estructura actual del sistema económico, el PIB se evalúa de la siguiente forma:  $PIB = C + I + G + (EX - IM)$  donde,

C = consumo privado.

I = inversión privada.

G = gasto gubernamental.

EX = exportaciones de bienes y servicios.

IM = importaciones de bienes y servicios.

**19** Durante los últimos años, la mayoría de escenarios en nuestro entorno económico manejaban tasas de crecimiento anual del PIB del 3%/a. Las economías en transición mantienen valores incluso muy superiores a éste. En el contexto de crisis actual, a menudo se escuchan comentarios asociados a la incapacidad de la economía de crear empleo hasta que el crecimiento del PIB no alcance valores del orden del 2%/a.

**20** La estructura actual de nuestro sistema económico se basa en la producción y venta de bienes de consumo, lo cual constituye una gran ineficiencia del sistema económico y limita mucho su capacidad de reacción en situaciones de crisis.

**21** En términos de la huella ecológica ([www.footprintnetwork.org](http://www.footprintnetwork.org)) en torno al año 1976 fue cuando la humanidad en su conjunto sobrepasó la capacidad de carga del medio. En el año 2007 (WWF, GFN, ZLS, 2010) la humanidad en su conjunto requería ya de 1,5 planetas Tierra para soportar su huella ecológica (huella ecológica de 2,7 gha/hab con una biocapacidad del planeta de 1,8 gha/hab), con algunos países como los Emiratos Árabes y Catar con una huella por encima de 10 gha/hab, otros como Dinamarca, Bélgica, y EE. UU. con una huella del orden de 8 gha/hab, y España con una huella de 5,42 gha/hab (la gha se refiere a una hectárea global, que representa una hectárea de terreno con una productividad equivalente a la capacidad de producción media del total de área terrestre y marina biológicamente productiva). Con un escenario BAU moderado, para el año 2030 la humanidad requeriría ya del orden de dos planetas Tierra para soportar su huella ecológica, con una tendencia creciente, que llegará a sobrepasar las 2,25 Tierras en el año 2050.

actual del sistema económico, las medidas de eficiencia nadan a contracorriente respecto a los requerimientos de “salud” económica del sector, por lo que su alcance se ve tremendamente limitado. La evidencia más apabullante de esta situación la vivimos a lo largo del año 2009 en nuestro país, en el que la situación de crisis del sistema económico que hemos atravesado ha hecho que los recursos económicos de la administración se invirtieran en proporcionar ayudas para mantener la estructura viciada del sistema económico, es decir, la venta de vehículos con bajos requerimientos de eficiencia, impulsando el modelo que está conduciendo a la crisis de nuestro sistema climático<sup>22</sup>, en lugar de invertir esos recursos escasos en la re-conversión del sistema económico.

Es decir, en el contexto actual no hay sitio para ambos: o mantenemos la “salud” del sistema económico, o mantenemos la “salud” del planeta. Y como hasta ahora la “salud” del sistema económico es percibida por el conjunto de la sociedad con tiempos de respuesta mucho más cortos y de forma mucho más directa, no hay lugar a dudas de cuál es la elección que tomamos: la “salud” del sistema económico. Pero esta “salud” también constituye una falacia, y nunca le podremos quitar las comillas, pues a la larga<sup>23</sup> nos conducirá a una situación de crisis económica mucho más profunda que la que hayamos experimentado hasta la fecha, marcada además por un elemento macroeconómico fundamental: la sobreexplotación de la capacidad del sistema en el que desarrollamos nuestra actividad.

Algo parecido sucede en el sector de la edificación, tan íntimamente relacionado con la situación de crisis económica que estamos atravesando. El mecanismo de mercado de este sector está basado exclusivamente en la venta de unidades de producto (edificios), en

lugar de en los servicios que el cliente quiere cubrir con esos edificios, por lo cual desaparece cualquier señal de mercado que impulse a que los edificios producidos resulten eficientes para cubrir los servicios que requiere el usuario<sup>24</sup>.

A la vista de esta situación resulta conveniente explorar con un poco más de detalle las opciones e implicaciones de este prerequisite de mantener un crecimiento relativo constante del PIB en nuestro sistema económico. De hecho, en el contexto de los enfoques macro para la elaboración de escenarios energéticos, el PIB es una de las variables independientes principales, cuando no la única, en la que se basan estos escenarios. Nosotros emplearemos, en pocas ocasiones, las aproximaciones macro para elaborar los escenarios, pero necesitamos elaborar un escenario de evolución del PIB para aquellos casos en que nos apoyemos en estas aproximaciones macro. Puesto que los escenarios de contracción, o incluso estancamiento del PIB, son difíciles de asimilar actualmente, y dado que para nuestros escenarios energéticos el efecto del escenario del PIB será relativamente limitado, hemos optado de forma conservadora por mantener un escenario BAU de PIB creciente, pero creemos que resulta interesante explorar las implicaciones de los escenarios de PIB eternamente crecientes para que empecemos a focalizar la imperiosa necesidad de reconvertir nuestro sistema económico y alinearlos con los requerimientos de eficiencia y sostenibilidad en lugar de que siga evolucionado en dirección contraria.

La intensidad energética (definida como cociente entre el consumo de energía y el PIB) es el parámetro más relevante desde el punto de vista de la eficiencia energética de nuestro sistema económico y, en la actualidad, es sobre el que se centran los esfuerzos para reducir el

<sup>22</sup> Podemos escuchar justificaciones por el lado de la administración que apuntan a que los nuevos vehículos vendidos gracias a estos apoyos son más eficientes que aquellos a los que sustituyen, por lo que se reducen las emisiones de GEI, lo cual podría ser “localmente” cierto en algunos casos (aunque dudoso en otros dado el elevado valor del límite de emisiones que se estableció: 149 g CO<sub>2</sub>/km), pero constituye una falacia a nivel global, pues mantiene vivo el mecanismo de mercado que conduce a que el número de vehículos siga aumentando y con ellos el nivel global de emisiones.

<sup>23</sup> Este “a la larga” no está tan lejano como sugiere la expresión, pues ya lo estamos empezando a experimentar. Pero en el contexto en el que se toman las decisiones políticas y en el que la sociedad experimenta las “urgencias” de cambio, sí que sigue quedando en un segundo plano.

<sup>24</sup> En (García Casais, X., 2009) se pueden encontrar ejemplos de modelos de negocio para el sector transporte y el de la edificación, en los que se muestra cómo podría estructurarse el sistema económico para evolucionar hacia una economía basada en prestaciones, en la cual la generación de beneficio quedara directamente vinculada a la eficiencia en lugar de al despilfarro.

impacto energético del sistema económico, que busca desacoplar el crecimiento económico del crecimiento en el consumo de energía.

Las mejoras<sup>25</sup> en intensidad energética acotan el crecimiento de la demanda con un PIB creciente. En efecto, tal y como nos muestra la siguiente expresión, para un valor dado del crecimiento económico ( $\Delta\text{PIB}/\text{PIB}$ ), las reducciones en la intensidad energética ( $\Delta(\text{PIB}/E) > 0$ ) atenúan el crecimiento del consumo de energía ( $\Delta E/E$ ):

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{\Delta\text{PIB}}{\text{PIB}} - \frac{\Delta\left(\frac{\text{PIB}}{E}\right)}{\frac{\text{PIB}}{E}}$$

Pero realmente se podría acotar mucho más, y llegar a invertir, el crecimiento de la demanda de energía si se anulara el crecimiento del PIB ( $\Delta\text{PIB} = 0$ ), tal y como nos muestra la siguiente expresión:

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{\Delta\text{PIB}}{\text{PIB}} - \frac{\Delta\left(\frac{\text{PIB}}{E}\right)}{\frac{\text{PIB}}{E}} = -\frac{\Delta\left(\frac{\text{PIB}}{E}\right)}{\frac{\text{PIB}}{E}}$$

En efecto, en esta situación, toda mejora en la intensidad energética se invierte directamente en una reducción del consumo de energía en lugar de simplemente “atenuar” el crecimiento de dicho consumo.

Sin embargo, en la mayoría de escenarios energéticos que se elaboran en la actualidad, incluso los que podríamos calificar como alternativos a los enfoques BAU, se siguen manteniendo tasas constantes de crecimiento del PIB como una de las hipótesis de partida fundamentales. Como ejemplo podemos citar (Arjun Makhijani, 2008), en el que se plantea la posibilidad de eliminar el uso de combustibles

fósiles y nucleares en EE. UU. mediante el desarrollo de escenarios para el año 2050. En esta referencia se plantea un escenario de crecimiento exponencial del PIB con una tasa anual constante del 3%/a, cuyos efectos energéticos se atenúan con un escenario de mejora exponencial de la intensidad energética, con una tasa anual constante de 2%/a. Es decir:

$$\frac{\Delta\left(\frac{\text{PIB}}{E}\right)}{\frac{\text{PIB}}{E}} = -0.02 \quad ; \quad \frac{\Delta\text{PIB}}{\text{PIB}} = 0.03$$

En estas condiciones, el crecimiento del consumo de energía también resulta ser exponencial, pero a una tasa del 1%/a en lugar de al 3%/a que hubiera resultado en ausencia de la mejora en intensidad energética, pero básicamente sigue siendo un crecimiento exponencial del consumo de energía:

$$\frac{\Delta E}{E} = 0.01$$

Otros ejemplos de escenarios energéticos recientes que incorporan tasas de crecimiento constante del PIB son los de (AIE, 2007), que a la vez son los empleados en (EREC, Greenpeace, 2008), y que para el conjunto del mundo tomaban  $\Delta\text{PIB}/\text{PIB} = 3,3\%/a$ , mientras que para la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico Europa (OCDE) asumen  $\Delta\text{PIB}/\text{PIB} = 1,7\%/a$ <sup>26</sup>.

Básicamente, entendemos que esta situación es debida a la necesidad de mantener un enfoque conservador en este punto del desarrollo de los escenarios, para no perder opciones de entrar en el debate de fondo en otros aspectos, como pueda ser la viabilidad de cubrir toda la demanda energética con energías renovables. Pero en algún momento

<sup>25</sup> Una mejora de la intensidad energética es una reducción de la misma, es decir, una reducción de la cantidad de energía necesaria por unidad de PIB.

<sup>26</sup> En (GP, EREC, 2010) cuyo escenario de referencia coincide con el WEO 2009 de la AIE extrapolado de 2030 a 2050, y donde el escenario de crecimiento económico es común tanto para los escenarios BAU como para los eficientes (al igual que en este estudio), las tasas anuales medias de crecimiento del PIB son del 3,39%/a a nivel mundial y del 1,37%/a a nivel de OCDE-Europa.

deberemos afrontar esta contradicción intrínseca del crecimiento exponencial en un medio finito, para plantearnos que “ya nos hemos hecho mayores”, y que ahora se trata de mantener las posibilidades de bienestar de las generaciones futuras, para lo cual será preciso reestructurar nuestro sistema económico para alinearlo con este objetivo básico.

A nivel mundial, el PIB ha crecido de media  $\Delta\text{PIB}/\text{PIB} = 3,3\%/a$  desde 1971 al 2002, y este crecimiento ha ido acompañado por un crecimiento de la demanda de energía primaria de 1,98%/a (por cada 1% de PIB, la demanda energía ha crecido 0,6%). Es decir, en este período hemos tenido una mejora media de la intensidad energética de  $\Delta(\text{PIB}/E)/(\text{PIB}/E) = 1,32\%/a$ .

De IMF (2008) podemos extraer un poco más de información de la evolución histórica reciente y proyecciones a corto plazo para algunos países de nuestro entorno, que recogemos en las figuras 12 y 13. Como podemos observar, la tendencia media en todos estos países ha sido al crecimiento, si bien las tasas

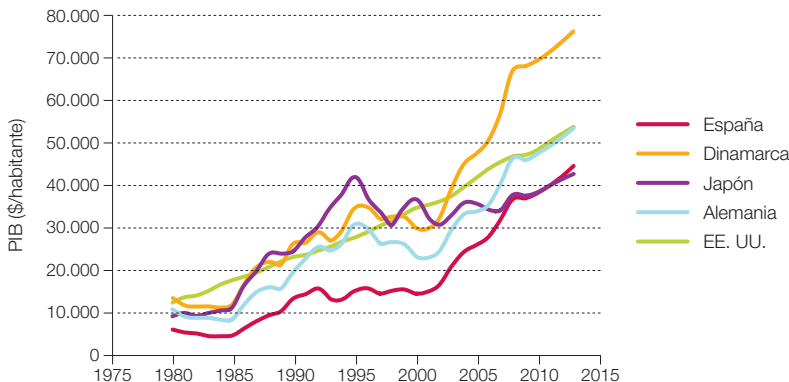
anuales de crecimiento han ido experimentando importantes fluctuaciones.

Pero analicemos con un poco más de detalle cuáles son las implicaciones de esta hipótesis de crecimiento exponencial sostenido:

Consideremos, en primer lugar, las tasas constantes de incremento del PIB (3%/a) y de mejora de la intensidad energética (2%/a) planteadas en (Arjun Makhijani, 2008), y analicemos sus repercusiones sobre las posibilidades de cubrir toda la demanda con energías renovables en España.

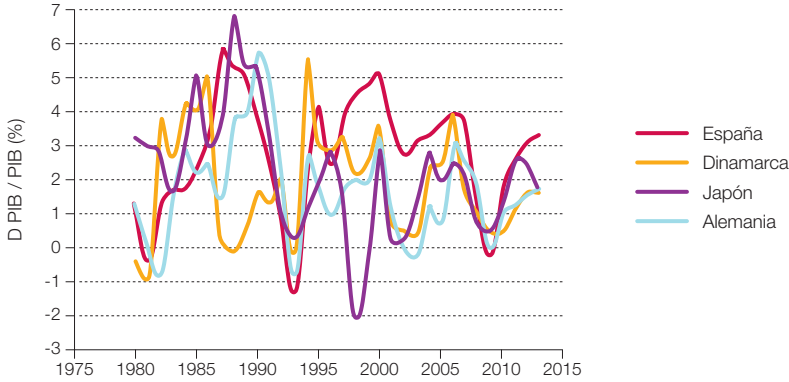
En los estudios de *Renovables 2050* (GP, 2005) y *Renovables 100%* (GP, 2007) se analizó la viabilidad técnica de cubrir la demanda de energía en la España peninsular, con energías renovables en un escenario para el año 2050, para concluir que el potencial disponible permitía cubrir hasta 56 veces la demanda de energía eléctrica y 10 veces la demanda de energía total en el año 2050. En este contexto de abundancia de recurso renovable<sup>27</sup>, consideramos como un buen indicador de los

**Figura 12.** Evolución histórica del PIB (EE.UU. \$; precios corrientes) per cápita en algunos países, elaborado a partir de datos (IMF, 2008).

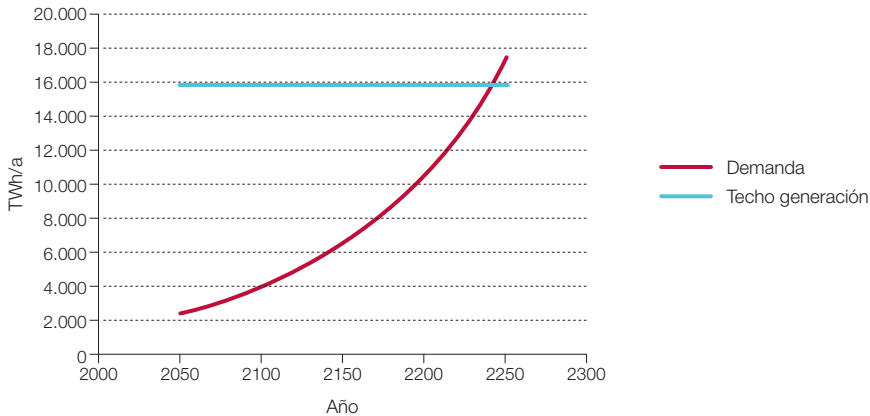


<sup>27</sup> Debemos tener en cuenta, sin embargo, que la explotación de todo este recurso de energía renovable requiere emplear una gran superficie de ocupación del territorio, tanto para la generación como para el transporte y distribución de esta energía, por lo que tanto desde esta perspectiva como desde la perspectiva de los costes del sistema energético, no resulta recomendable explotar todo este potencial.

**Figura 13.** Tasas de crecimiento anual históricas del PIB (precios constantes) en algunos países, elaborado a partir de datos (IMF, 2008).



**Figura 14.** Evolución de la demanda energética total de la España peninsular, en relación al potencial de recurso renovable disponible, en un escenario de crecimiento del 3%/a del PIB y mejora del 2%/a de la intensidad energética, partiendo del punto final del escenario desarrollado en (GP, 2005).



límites del crecimiento la medida de la demanda de energía en términos relativos al potencial disponible.

Si partimos, por tanto, de una demanda de energía total en 2050 en términos eléctricos<sup>28</sup> de 2.381 TW/h/a, un escenario que mantuviera las tasas de crecimiento del PIB y de la

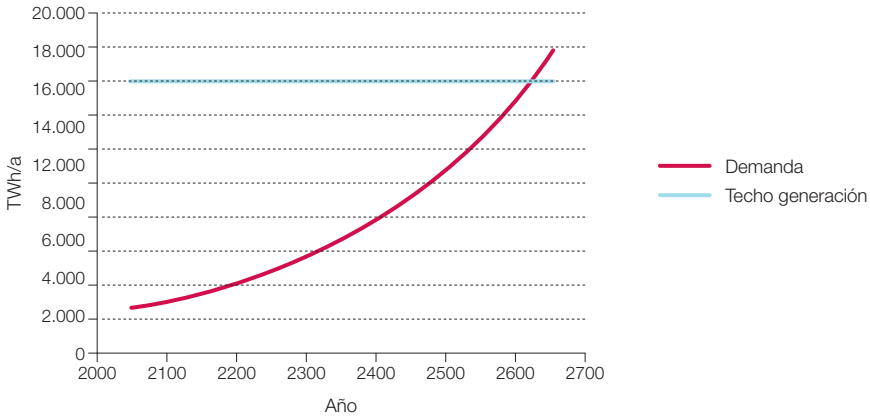
mejora de la intensidad energética planteadas en (Arjun Makhijani, 2008) a partir del año 2050, nos conduciría a una evolución del crecimiento de la demanda energética en relación al potencial disponible, a partir de fuentes renovables como el indicado en la figura 14, para conducir a un agotamiento del recurso renovable disponible en torno al año 2240.

**28** En unas condiciones parecidas a las supuestas en (GP, 2007), pero adaptando la población al nuevo escenario de población en 2050, mejorando el rendimiento eléctrico-térmico hasta 160% (desde el 90%) por la incorporación de bombas de calor (más acorde con el planteamiento de la cobertura de la demanda térmica que hacemos en este informe), y adaptando los porcentajes de la parte de demanda no eléctrica a 55% - 45% en térmico-transporte (era 60%-40%) para ajustar la participación del transporte en los balances energéticos empleados como punto de partida en este estudio. En estas condiciones, los valores de partida en 2050 son 1.943 TW/h/a de energía final [frente a los 1.525 TW/h/a de (GP, 2007)], y 2.381 TW/h/a de demanda total eléctrica [frente a los 2.142 TW/h/a de (GP, 2007)].

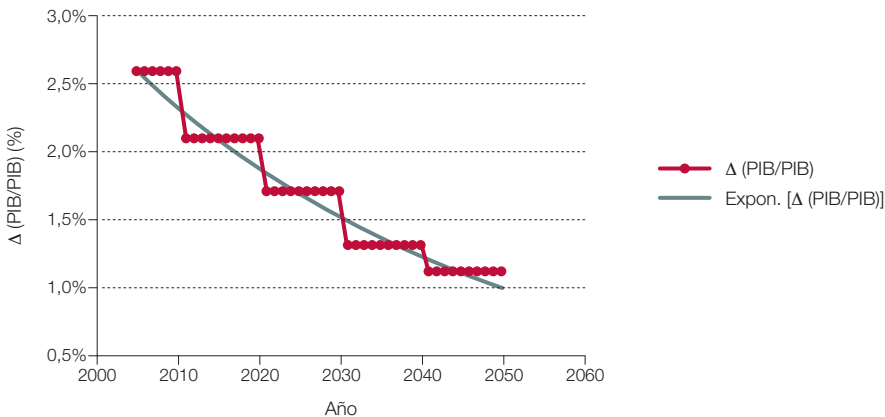
Incluso si suponemos un menor crecimiento del PIB del 1%/a, con la misma relación de la mejora de intensidad energética al crecimiento del PIB que en (Arjun Makhijani, 2008), la situación sería tal que en el año 2618 agotaríamos

el recurso renovable disponible (figura 15), cuando al sol todavía le quedarían 5.000 millones de años de vida, lo cual indica una clara insostenibilidad del modelo de desarrollo basado en los crecimientos exponenciales.

**Figura 15.** Evolución de la demanda energética total de la España peninsular, en relación al potencial de recurso renovable disponible, en un escenario de crecimiento del 1%/a del PIB y mejora del 0,67%/a de la intensidad energética, partiendo del punto final del escenario desarrollado en (GP, 2005)

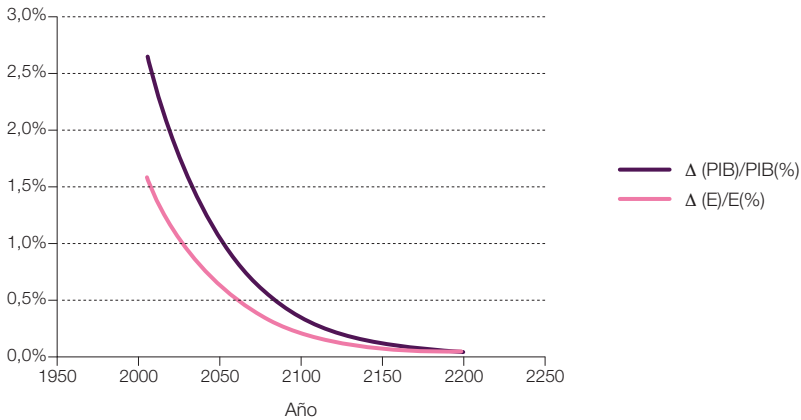


**Figura 16.** Tasas de crecimiento anual del PIB (precios constantes) supuestas en los escenarios (AIE, 2007) y (EREC, Greenpeace, 2008), junto a un ajuste exponencial de las mismas.





**Figura 17.** Tasas de crecimiento anual del PIB y de la demanda de energía para OCDE-Europa extrapoladas más allá del año 2050 a partir del ajuste exponencial de los escenarios (AIE, 2007) y (EREC, GP, 2008) hasta el año 2050.



Por tanto, en cualquier contexto de sostenibilidad, parece imprescindible plantearse una saturación, aunque sea a largo plazo, del crecimiento del PIB. Con el fin de plantear esta saturación bajo un contexto BAU, hemos partido de los escenarios del PIB presentados en el WEO de la AIE (AIE, 2007) para OCDE-Europa<sup>29</sup> hasta el año 2030, y extrapolados por (EREC, GP, 2008) hasta el año 2050. En la figura 16 mostramos este escenario de las tasas de crecimiento del PIB asociadas a este escenario de la AIE, así como un ajuste exponencial de las mismas. Como podemos observar, realmente el planteamiento BAU de la AIE ya constituye un planteamiento de contracción en el crecimiento económico, de tal forma que si extrapolamos dicho escenario más allá del horizonte considerado, nos conduce eventualmente a una saturación del crecimiento y estancamiento del PIB.

Si procedemos a extrapolar el ajuste exponencial del escenario de crecimiento económico de la AIE, y consideramos que se mantiene el ratio histórico entre la tasa de crecimiento del

PIB ( $\Delta \text{PIB}/\text{PIB}$ ) y del consumo de energía ( $\Delta \text{E}/\text{E}$ ), alcanzaríamos una estabilización del crecimiento del PIB y de la demanda de energía en torno al año 2200 tal y como nos muestra la figura 17.

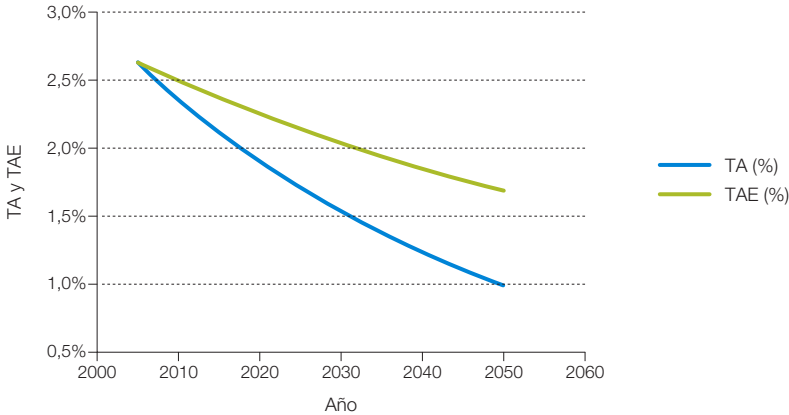
A pesar de la convergencia planteada por este escenario a largo plazo, las tasas de crecimiento económico hasta 2050 son elevadas, lo que conduce a un crecimiento absoluto de la economía que incluso parece dudoso en el contexto actual. En la figura 18 presentamos las tasas anuales (TA) y tasas anuales equivalentes<sup>30</sup> (TAE) de crecimiento del PIB en el escenario hasta el año 2050. La TAE resultante hasta 2050 es de 1,68%/a que implica un crecimiento del PIB respecto al actual del 98% (prácticamente doblar el PIB actual).

De hecho, este escenario conduce a un importante crecimiento del PIB hasta el año 2050, periodo en el que prácticamente no se aprecian las tendencias de contracción del crecimiento (figura 19). Es preciso extender

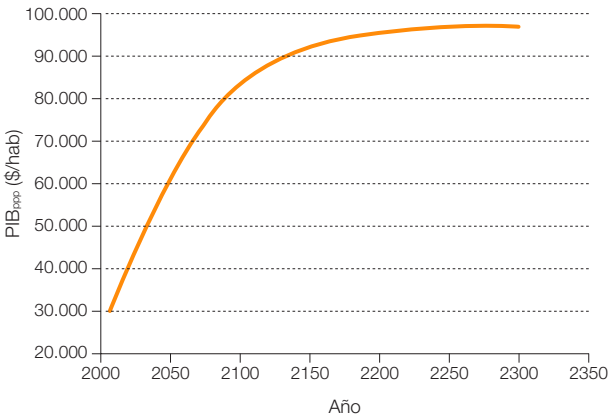
<sup>29</sup> Tanto en el WEO de la AIE como en el EREC (GP, 2008) no aparece un tratamiento específico de España. Por ese motivo empleamos los valores de OCDE-Europa como los más cercanos a nuestra realidad económica de cara a la elaboración de los escenarios preliminares de este apartado.

<sup>30</sup> La TAE es una tasa de crecimiento anual que al mantenerla constante en el período de tiempo considerado conduce a una evolución equivalente a la experimentada con la tasa anual (TA) variable año a año.

**Figura 18.** TA y TAE del PIB en el escenario de la AIE (y adoptado en este estudio) hasta el año 2050.



**Figura 19.** Escenario adoptado de crecimiento del PIB (precios constantes), extendido más allá del límite temporal considerado en este estudio (año 2050) para apreciar su tendencia de contracción y saturación.



significativamente el plazo temporal para empezar a apreciar la contracción del crecimiento en el escenario planteado. El valor final de saturación del PIB en el escenario planteado, del orden de 96.000 \$/hab, parece realmente elevado a la luz del contexto de crisis actual<sup>31</sup>, y hace pensar que las tasas de crecimiento del PIB que realmente cabe esperar sean sensiblemente inferiores a las

que se deducen de la extrapolación del escenario de la AIE, habida cuenta de los claros signos de contracción y convergencia que actualmente muestra la situación del mundo, desde los puntos de vista social, político y medio ambiental. A pesar de todo, de forma conservadora<sup>32</sup> vamos a asumir este escenario de crecimiento económico para el desarrollo de este estudio.

<sup>31</sup> Este PIB es del orden del actual en las economías de mayor PIB del mundo (Luxemburgo).

<sup>32</sup> Conservador en el sentido de que una mayor contracción del crecimiento económico conducirá a una menor demanda de energía.

Con este escenario de crecimiento del PIB, y considerando que se mantiene el ratio histórico entre la tasa de crecimiento del PIB ( $\Delta\text{PIB}/\text{PIB}$ ) y del consumo de energía ( $\Delta\text{E}/\text{E}$ ), la demanda de energía en nuestro país podría cubrirse sobradamente<sup>33</sup> con el recurso de energías renovables disponible.

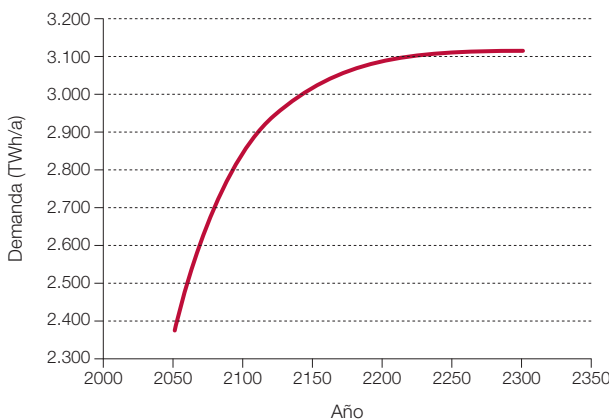
En efecto, en estas condiciones, la evolución de la demanda de energía total en términos eléctricos<sup>34</sup> a partir del año 2050<sup>35</sup> sería la mostrada en la figura 20 que, como vemos, conduce a una saturación de la demanda de energía en torno al año 2300, al mantener el porcentaje del uso del potencial de generación por debajo del 20% tal y como nos muestra la figura 21.

Por tanto, vemos que ante un planteamiento de saturación del crecimiento económico compatible con los escenarios actuales de la AIE, los recursos renovables de los que disponemos en nuestro país tienen capacidad

suficiente para mantener de forma sostenible nuestra actividad económica. Sin embargo, para alcanzar esta sostenibilidad, es preciso afrontar abiertamente el hecho de que, aunque sea más allá del año 2050, resulta imprescindible que las tasas de crecimiento económico se acaben anulando y, por tanto, será preciso trabajar en la estructura de nuestro sistema económico para que esta situación de crecimiento nulo estable no suponga el desencadenamiento de una situación de crisis crónica.

Por otro lado, también debemos tener presente que esta sostenibilidad local, en lo que se refiere a la disponibilidad de recursos renovables en nuestro país, no tiene por qué estar asociada a una sostenibilidad global. En este sentido, consideramos que en la actualidad ya se dan indicios suficientes de la imperiosa necesidad de convergencia entre las distintas economías del planeta, para pensar que la estabilización de nuestra economía

**Figura 20.** Escenario de evolución de la demanda de energía en la España peninsular más allá del año 2050, partiendo del resultado adaptado del informe *Renovables 100%*, y consecuente con el escenario de evolución del PIB anteriormente presentado y bajo la hipótesis de que se mantiene constante la relación entre la tasa histórica anual de crecimiento del PIB y la de la demanda de energía.

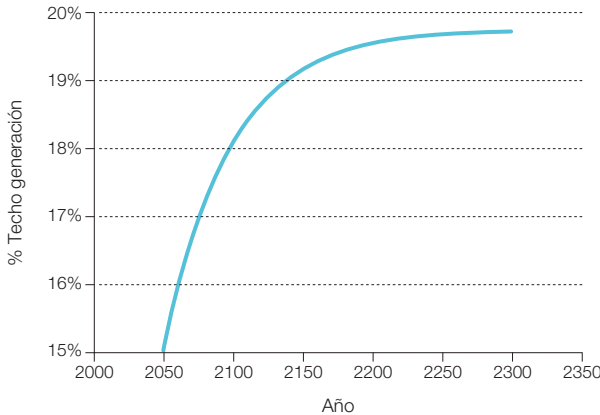


**33** Este escenario de demanda energética proyectado más allá del periodo de análisis de este estudio es una estimación preliminar basada en el mantenimiento de la relación entre las tasas anuales de crecimiento relativo del PIB, y de la demanda de energía. A lo largo de este informe afinaremos más sobre el escenario de crecimiento de la demanda energética hasta el año 2050, para explorar el potencial de las medidas de ahorro y eficiencia, con el objetivo final de poder cubrir el total de la demanda usando una cantidad menor de recursos energéticos renovables, y a un menor coste del sistema energético.

**34** En unas condiciones parecidas a las supuestas en (GP, 2007), pero adaptando la población al nuevo escenario de población en 2050, mejorando el rendimiento eléctrico-térmico hasta 160% (desde el 90%) para reflejar la mayor participación de bombas de calor, y adaptando porcentajes de la parte de demanda no eléctrica a 55%-45% en térmico-transporte (era 60%-40%) para ajustar la participación del transporte en 2006. En estas condiciones, los valores de partida en 2050 son 1.943 TWh/a de energía final [frente a los 1.525 TWh/a de (GP, 2007)], y 2.381 TWh/a de demanda total eléctrica [frente a los 2.142 TWh/a de (GP, 2007)].

**35** Partiendo del valor correspondiente a la demanda de energía en el año 2050 obtenido del estudio (GP, 2007) como se ha indicado anteriormente.

**Figura 21.** Porcentaje del recurso disponible de energías renovables en la España peninsular según (GP, 2005), necesario para cubrir la demanda de energía en el escenario anteriormente expuesto.



debería producirse en plazos más cortos y en valores inferiores del PIB asintótico, lo cual implicaría plantearse escenarios con menores tasas de crecimiento anual del PIB de los aquí adoptados y, por tanto, el reconvertir más rápidamente nuestro sistema económico para que la situación de crecimiento nulo del PIB no nos conduzca a episodios de crisis<sup>36</sup>. En efecto, el plazo temporal del año 2300 para estabilizar la demanda energética de nuestro país que nos proporcionan estos escenarios, parece ser totalmente incompatible con el requerimiento del sistema climático de alcanzar un máximo en las emisiones de GEI a nivel mundial para el año 2015. En este sentido resulta necesario empezar a articular cuanto antes los cambios en escalón que permitan pasar de mantener estas tasas de crecimiento anual positivas en la demanda energética, a unas tasas negativas (decrecimiento) en el menor plazo de tiempo posible y, en paralelo, proceder a una introducción acelerada de generación renovable en el sistema energético para conseguir alcanzar ese pico de emisiones en el corto plazo de tiempo disponible.

## 2.2 Integración

Tradicionalmente hay una fuerte tendencia a enfocar los análisis relativos al cambio del modelo energético desde un punto de vista excesivamente sectorial dentro del sistema energético, y sin trascender a otros sistemas de nuestro modelo de organización. En el contexto actual, estos enfoques tan parciales no tienen ya capacidad de producir la velocidad de cambio requerida (opciones muy bajas de generar cambios en escalón), por lo que es preciso analizar el problema desde un punto de vista integral dentro del sector energético, y liberar mecanismos dentro de otros sistemas distintos a los de ámbito técnico, como el propio sistema económico. Y en este contexto, soluciones que parecían ser las óptimas dentro del alcance del enfoque sectorial parcial, pueden dejar de estar en el centro de atención para abrir paso a otras soluciones con un potencial de cambio muy superior.

Estos planteamientos de integración intersectorial y entre los distintos sistemas de nuestro modelo de organización, requieren

<sup>36</sup> En este sentido, el episodio de crisis vivido en los años 2008-2010 en el que se anuló (o incluso invirtió) la tasa anual de crecimiento del PIB en nuestro país, es una clara indicación de la inmadurez de nuestro sistema económico para afrontar los requerimientos de la sostenibilidad.

como característica diferencial el liberar el atributo de *inteligencia global* como denominador común subyaciendo en la estructura de todos los sistemas en los que estructuramos nuestro modelo de organización y desarrollo. Así, vamos a tener que rodearnos rápidamente de edificios inteligentes, redes eléctricas inteligentes, sistemas de transporte inteligentes, etc., pero también de sistemas económicos inteligentes, sistemas sociales inteligentes y sistemas políticos inteligentes. La velocidad de cambio del sistema menos inteligente será la que marcará la velocidad de cambio global que como sociedad podemos desarrollar: por tanto, no debemos descuidar ninguno de ellos en su evolución hacia la inteligencia, por mucho que en la actualidad nos resulte mucho más auto reconfortante y satisfaga más nuestro ego el limitarnos a hablar de sistemas técnicos inteligentes.

Dentro del propio sistema energético, la integración pasa por un lado por la electrificación de los distintos sectores, de tal forma que al compartir el vector energético principal, se puede sacar provecho de las sinergias entre los distintos sectores y de la capacidad de valorizar esa electricidad “residual” procedente de fuentes renovables, que se genera como consecuencia de los requerimientos de regulación al plantearnos un sistema eléctrico alimentado al 100% con fuentes de energía renovable (GP, 2007). Esta electrificación también evita en gran medida el requerimiento de duplicidad de infraestructuras energéticas, cuando disponemos de tecnología capaz de proporcionar los mismos servicios con niveles de eficiencia comparables o superiores mediante el vector electricidad. Por último, esta integración vía electrificación nos ofrece en sí misma la opción de acceder a uno de los principales elementos de evolución en escalón, al impulsar la evolución hacia la eficiencia e integración de renovables de algunos de los

sectores energéticos dominantes (como edificación y transporte) mucho más allá de lo que permitiría su evolución tendencial.

Y por otro lado la integración dentro del sector energético pasa por la incorporación de la demanda en la operación del sistema como uno de sus componentes principales, para romper el planteamiento BAU de gestionar y gobernar la operación de estos sistemas exclusivamente desde el lado de la oferta, para lo cual, el despliegue de inteligencia por el sistema energético y por el sistema económico constituye uno de los requisitos fundamentales.

## 2.3 Evolución en escalón

Si observamos con perspectiva la situación actual, tanto a nivel nacional como global, la evolución pasada, las restricciones que nos impone el sistema climático, y la capacidad de cambio que demuestran nuestros políticos, no podemos sino llegar a la conclusión de que a estas alturas requerimos introducir modificaciones estructurales para facilitar una evolución en escalón (discontinuidad en la derivada evolutiva): en efecto, la urgencia de cambio ya no da para evoluciones continuas en derivada, la opción de ir por esta vía caducó con nuestra inactividad en el pasado.

Sin embargo, tal y como analizaremos en este trabajo, disponemos de herramientas para acometer esta evolución discontinua. La reestructuración de los sistemas que forman la base de nuestra sociedad, libera mecanismos que permiten alcanzar una discontinuidad en la derivada evolutiva sin implicar esfuerzos fuera del alcance. Pero realmente necesitamos ya acometer este proceso de cambio en los países en los que hemos basado nuestro desarrollo en los modelos anteriores, para que la nueva línea de evolución atraiga a las economías emergentes,

antes de que se hipotequen durante los próximos 50 años en la potenciación exponencial de la senda equivocada que nos ha conducido a la situación actual.

Y realmente es una suerte que tanto la evolución de la tecnología, como la baja integración hasta la fecha entre los sistemas en que estamos organizados, así como la ausencia de orientación a objetivos globales en los mismos, nos brinden el potencial de articular mecanismos de respuesta rápida que conduzcan a evoluciones en escalón. De no ser por esta opción, el panorama actual sería realmente deprimente, pues la evolución tendencial nos conduciría de cabeza al precipicio sin ninguna opción de evitarlo.

La incorporación de inteligencia, tanto en el sistema energético como en los sistemas económico y político, constituye el ingrediente fundamental para activar estos cambios en escalón, y afortunadamente tanto desde el punto de vista tecnológico, como desde una perspectiva sociológica, ya estamos completamente capacitados para desplegar el atributo de inteligencia en nuestros sistemas: la ausencia actual de inteligencia en ellos es tan grande que nos proporciona un gran margen de mejora.

Esta inteligencia adicional proporciona la capacidad de explotar grados de libertad adicionales del sistema energético que hasta la fecha no han entrado en juego, y configurar así estos mecanismos de respuesta rápida que conducen a cambios en escalón. Uno de estos grados de libertad adicionales, sin duda lo constituye la participación activa de la demanda en la operación y gestión del sistema energético, lo que proporciona un gran incremento en la flexibilidad del sistema, lo cual constituye un atributo imprescindible para la integración eficiente de la generación

procedente de energías renovables, y conduce hacia una democratización del sistema energético con un gran potencial de expansión a otras regiones del planeta en cortos periodos de tiempo.

## 2.4 Mecanismos de respuesta rápida

Es curioso observar la distinta atención que prestamos a los procesos de realimentación rápida y realimentación lenta en los grandes problemas que nos afectan. Si tomamos como ejemplo la problemática asociada al cambio climático e insostenibilidad de nuestra sociedad, hay dos procesos relacionados que merecen nuestra atención:

Por un lado está la respuesta del sistema climático, a la cual dedicamos importantes esfuerzos de modelado. Sin embargo, en los modelos que actualmente usamos no se encuentran implementados los procesos de realimentación climática lenta (como el derretimiento de la capa de hielo de Groenlandia o la liberación de carbono del permafrost). Implícitamente hemos asumido que estos procesos de realimentación lenta tienen tiempos de respuesta superiores a lo que nos va a llevar reconducir las concentraciones atmosféricas de CO<sub>2</sub>-eq hacia valores seguros, por lo que pretendemos basar los acuerdos internacionales sobre las necesidades de reducción de emisiones en modelos que no incorporan estos mecanismos físicos. Sin embargo, el sistema climático ha avanzado la manifestación de sus mecanismos de realimentación lenta del orden de 80 años respecto a lo que pronosticaban nuestros modelos, para hacer evidente que el cambio climático está aconteciendo a velocidad muy superior a la que pronosticaban los modelos del IPCC en su informe del año 2007, y basándose en los que se estableció el punto

de partida<sup>37</sup> de la mesa de negociaciones del COP15 en Copenhague.

Por otro lado se encuentra la estructura básica de nuestro sistema económico, basada en la venta de productos en lugar de en proporcionar servicios, y metido en una vorágine de crecimiento ilimitado intrínsecamente insostenible. Es decir, un sistema económico con un fundamento radicalmente opuesto a la sostenibilidad, y con una fuerza destructora muy superior a la de todas las medidas paliativas que podamos probar a introducir. En estas condiciones, en lugar de apostar por mecanismos de respuesta rápida (como la reestructuración del sistema económico para basarlo en prestaciones energéticas), nos centramos exclusivamente en la aplicación de mecanismos de realimentación lenta, como los procesos de certificación energética de los edificios, que en el mejor de los casos<sup>38</sup> producirán un efecto significativo en tiempos del orden de 100 años, superior al plazo del que disponemos para resolver el problema. De hecho, cuando nos enfrentamos a un periodo de crisis como el que se desencadenó en el año 2008, las respuestas desde el lado de los sistemas político y administrativo se dirigen exclusivamente a inyectar suero a los mecanismos básicos del modelo económico que nos ha conducido a la situación actual, en lugar de impulsar el cambio necesario.

Para potenciar la transición desde la situación actual a un contexto de eficiencia con un sistema energético descarbonizado, en los plazos de tiempo disponibles y con capacidad de exportar a tiempo este modelo energético a las economías emergentes, que dominarán las emisiones de GEI en unos pocos años, resulta imprescindible que activemos mecanismos de cambio de respuesta rápida. Afortunadamente para nosotros todavía contamos con este as en la manga, pero no podemos postergar por más tiempo su puesta en escena.

Mecanismos de respuesta rápida son por ejemplo los asociados a activar un cambio en la estructura del sistema económico para pasar de vincular directamente el nivel de beneficio con el de despilfarro a vincularlo con el de ahorro. La activación de estos cambios de rumbo en el sistema económico no requiere más que de una modificación de las reglas de juego puesta en escena por la emisión de las señales de precios e incentivo adecuados.

El despliegue de inteligencia por los sistemas técnicos, si va acompañado del correspondiente despegue de inteligencia en los sistemas político y administrativo para permitirle desarrollar todo su potencial, en lugar de ponerle barreras, también libera una gran cantidad de mecanismos de respuesta rápida, que se pueden realimentar sinérgicamente con un sistema económico inteligente para darle la vuelta radicalmente al panorama de nuestro sistema energético.

Estos mecanismos de respuesta rápida están al alcance de la mano, pero probablemente, dado el grado de madurez de los sistemas político y administrativo, requieran de un empujón decisivo por parte del sistema social para activarlos, y hacer que los sistemas político y administrativo asuman sus responsabilidades en este proceso.

## 2.5 Transición hacia la era de la inteligencia

Por curioso que parezca, solo muy recientemente hemos empezado a oír hablar de la “inteligencia” como un componente diferencial de algunos de nuestros sistemas, cuya incorporación se percibe como un paso fundamental para conseguir mantenernos dentro de las condiciones de contorno que nos impone nuestro sistema climático.

<sup>37</sup> Desafortunadamente, el resultado del COP15 en Copenhague quedó incluso muy por debajo de los requerimientos de estos puntos de partida, lo que retrasó una vez más la adopción de medidas consistentes con la evidencia científica, dificultando todavía más la resolución de la problemática planteada como consecuencia de los retrasos adicionales.

<sup>38</sup> Es decir, en el caso de que estén bien implementados y consigan tirar del mercado en la dirección deseada, lo cual no siempre es el caso.

A lo largo de la historia de la humanidad, los sistemas que hemos ido articulando han estado gobernados por componentes, por lo general, bastante distantes del concepto de inteligencia colectiva o global que ahora empezamos a ver despuntar. Mientras el impacto de la especie humana se ha encontrado bien por debajo de la capacidad de carga del planeta, esta ausencia de inteligencia no ha trascendido a nivel global<sup>39</sup>, por lo que ha sido sistemáticamente desplazada<sup>40</sup>. Pero en la situación actual, en la que nuestra actividad ha sobrepasado rápida y claramente la capacidad de carga del sistema terrestre, ha surgido una gran urgencia por recurrir a esta inteligencia como una de las pocas tablas de salvación a las que todavía nos podemos agarrar.

Sin embargo, no se nos debe escapar el enfoque parcial que se está dando a esta característica de inteligencia, curiosamente limitando su alcance al de los sistemas técnicos desarrollados por el ser humano: redes eléctricas inteligentes, sistemas de transporte inteligentes, edificios inteligentes, etc. Bien es cierto que es en la actualidad cuando se han liberado a gran escala las tecnologías capaces de introducir inteligencia en nuestros sistemas técnicos, pero ello no nos debe cegar en relación al alcance necesario de la incorporación de inteligencia en nuestros sistemas, si queremos que con ello seamos capaces de producir el cambio necesario en el corto plazo de tiempo disponible.

En efecto, el alcance de la incorporación de inteligencia debería extenderse al conjunto de nuestros sistemas:

- Sistema político.
- Sistema administrativo.
- Sistema social.
- Sistema económico.

- Sistemas técnicos (red eléctrica inteligente, sistema de transporte inteligente, edificios inteligentes, etc.).

Y es precisamente dentro de algunos de estos sistemas, distintos a los sistemas técnicos, donde reside el mayor potencial de producir cambios en escalón que permitan apartar suficientemente nuestra trayectoria evolutiva de los escenarios BAU.

No debemos perder de vista que sin la necesaria incorporación de inteligencia en el sistema político y en el sistema administrativo, no será posible materializar el potencial de cambio que nos brinda la incorporación de inteligencia en los otros sistemas. Y en este sentido, madurez y responsabilidad son los primeros síntomas de inteligencia global que se deben internalizar.

Asimismo, tampoco debemos dejarnos engañar por el espejismo de que basta con incorporar la inteligencia en los sistemas técnicos: sin una incorporación de inteligencia en el sistema económico y social, la mayoría de los beneficios de la incorporación de inteligencia en los sistemas técnicos quedarán fuera de nuestro alcance.

El contexto E3.0 descansa fuertemente sobre esta incorporación de inteligencia en todos los sistemas y en sus interacciones, pues es precisamente aquí donde reside uno de los mayores potenciales de implementar cambios en escalón sobre la evolución BAU. Sin embargo, dada la naturaleza del alcance del estudio que se encuentra centrado en el sistema energético, el mayor esfuerzo se va a centrar en analizar el potencial de los elementos técnicos para desarrollar el cambio requerido, presuponiendo que el resto de sistemas acompañan y guían el desarrollo de los sistemas técnicos.

<sup>39</sup> Si bien a nivel local siempre se han dejado sentir los efectos de esta falta de inteligencia.

<sup>40</sup> En este sentido, resulta bastante indicativo y acertado el título de la película que se estrenó en septiembre de 2008 describiendo cómo en 2055 un superviviente de la catástrofe climática planetaria analiza qué es lo que estaba pasando en la Tierra en el año 2008: "The Age of Stupid".



Pasamos a continuación a comentar algunos aspectos relevantes en relación a las distintas dimensiones involucradas en la configuración de un contexto E3.0.

### 2.5.1 Evolución de planteamientos oferta-demanda

Tradicionalmente, la forma que hemos tenido de estructurar la cobertura de la demanda de servicios energéticos ha estado enfocada exclusivamente del lado de la oferta, sin involucrar a la propia demanda en la organización de la cobertura de ese servicio. En efecto:

- El sistema eléctrico se regula exclusivamente desde el lado de la oferta (generación). Se deja que la demanda evolucione de forma totalmente ajena a las necesidades, y se procede a adaptar la capacidad de generación para acoplarse a la demanda, basándose en una previsión unilateral de cuál será el comportamiento futuro de la demanda.
- En el sector transporte se realizan aproximaciones discretas y de poca precisión a la estructura de la demanda, de acuerdo con la cual se establecen unas rutas y horarios fijos a los que la demanda debe someterse<sup>41</sup> si quiere emplear estos medios de transporte.
- En el sector edificación se construyen edificios unilateralmente desde el lado de la oferta, lo que conduce a un parque de edificios muy superior al requerido, y con unos criterios de eficiencia en el uso prácticamente nulos<sup>42</sup>. Posteriormente estos edificios se dotan de unos sistemas de generación con una capacidad mucho más elevada de lo que requeriría un edificio eficiente, e incluso que la demanda media<sup>43</sup> del propio edificio.

Este enfoque, estructurado exclusivamente desde el lado de la oferta, es intrínsecamente muy ineficiente:

- La regulación desde el lado de la oferta del sistema eléctrico implica, en un contexto BAU, poner en juego centrales de bajo rendimiento energético<sup>44</sup> que operan durante muy pocas horas al año, así como disponer de una red de transporte y distribución tremendamente sobredimensionada en relación a la demanda media (dimensionada para picos), y centrales continuamente dispuestas para entrar en operación (potencia rodante) que prácticamente no aportan generación útil al sistema pero le hacen incurrir en unos consumos parásitos. Cuando las renovables empiezan a representar una contribución significativa, este enfoque basado en la oferta conduce<sup>45</sup> a la necesidad de disipar capacidad de generación eléctrica renovable, aspecto al que ya estamos asistiendo hoy en día en España con el grado de penetración eólica y solar, y que en el extremo puede conducir a la necesidad de disipar<sup>46</sup> prácticamente tanta capacidad de generación como la electricidad útil producida tal y como mostramos de forma cuantificada en (GP, 2007).
- En el sector transporte, la estructuración desde el lado de la oferta conduce a situaciones en las que el denominado “transporte público”, potencialmente de mayor eficiencia energética que el particular, alcanza bajas cotas de utilización por no tener capacidad de ajustarse a los requerimientos de la demanda, o que incluso se convierta en un modo de transporte altamente ineficiente<sup>47</sup>. En general, este planteamiento desde el lado de la oferta conduce a unos recorridos de transporte fijos, transitados con vehículos adaptados a la

<sup>41</sup> Resultado: abrumadora mayoría del transporte particular en la cobertura de la demanda de movilidad, con unas tasas de propiedad de vehículo particular increíblemente elevadas.

<sup>42</sup> Pues el constructor / promotor no va a hacerse cargo de los costes económicos para operar el edificio.

<sup>43</sup> Pues se dimensionan para la demanda pico incrementada en los correspondientes “factores de seguridad”.

<sup>44</sup> Este bajo rendimiento energético está asociado a unos bajos costes de inversión, que convierten a estas centrales en las más apropiadas para situaciones en las que se va a operar pocas horas al año.

<sup>45</sup> En ausencia de una integración del sistema energético, que es lo que corresponde a un enfoque basado en la oferta. Una integración real del sistema energético requiere de una participación muy activa de la demanda.

<sup>46</sup> Este concepto de necesidad de disipación de capacidad de generación eléctrica renovable es lo que frecuentemente a lo largo de este informe referimos como “electricidad residual”, en un contexto de gran penetración renovable.

<sup>47</sup> Como por ejemplo un autobús interurbano de 64 plazas transportando un único pasajero, y a lo largo de un trayecto que es el doble de largo de lo necesario.

demanda punta y por tanto con bajo factor de capacidad.

- En el sector edificación, la estructuración desde el lado de la oferta nos ha conducido, por un lado, a un parque de edificios altamente ineficientes, que demandan cantidades muy elevadas de energía y a menudo de la forma más inconveniente posible<sup>48</sup>, lo que obliga a poner en marcha centrales de baja eficiencia y a sobredimensionar las redes de distribución y equipos de transformación asociados. Adicionalmente los edificios se dotan de sistemas energéticos muy sobredimensionados respecto a la demanda media, con la consiguiente ineficiencia económica o energética<sup>49</sup>.

Las causas fundamentales de este planteamiento orientado desde la oferta probablemente podemos encontrarlas entre las siguientes:

- Mayor comodidad desde el lado del actor que oferta el servicio. Su único acercamiento a la demanda consiste en realizar un análisis prospectivo de por dónde andará el mercado que quiere abastecer<sup>50</sup>, y valorar si dicho mercado le proporciona un margen de negocio aceptable. El evitar las interacciones, o limitarlas al máximo<sup>51</sup>, con ese ente difuso<sup>52</sup> que es la demanda, siempre ha sido una prioridad que simplificaba considerablemente la estructuración del modelo de negocio.
- Introducción de diferencias competitivas que permiten que solo unos pocos, aquellos que disponen del capital y los medios suficientes para plantearse la cobertura unilateral de la demanda desde el lado de la oferta, puedan optar a “explotar” esos nichos de mercado. Este concepto se extiende incluso al tipo de tecnologías

empleadas para cubrir la demanda de ese servicio: si esas tecnologías están tan solo al alcance de unos pocos<sup>53</sup>, se verá reducida la competencia en la cobertura de esos nichos de mercado.

Pero es precisamente por este enfoque basado en la oferta, que nuestro sistema energético es, en la actualidad, tan abrumadoramente dependiente de fuentes energéticas concentradas y poco democráticas<sup>54</sup>. Sin embargo, esta situación ha llegado a sus límites al acercarnos al agotamiento de esos recursos y al reclamar el conjunto de la población mundial acceso a unos servicios energéticos que esos recursos no pueden proporcionarles. Esto, junto a la manifiesta superación de las condiciones de contorno que nos imponía el sistema climático, ha desencadenado la urgencia de la transición hacia un contexto E3.0.

Cuando se ponen en juego herramientas, como la inteligencia de los sistemas en los que estructuramos nuestra sociedad, que permiten articular la participación activa y directa de la demanda en la cobertura de los servicios, se libera un tremendo potencial de eficiencia y de articular cambios en escalón. El contexto E3.0 está por tanto basado en una participación activa de la demanda.

Probablemente uno de los principales elementos que caracterizan los enfoques basados en la oferta es su rigidez, aspecto que además de llevar asociadas una serie de ineficiencias energéticas y económicas, les hace inviables para adaptarse a una situación de cambio como en la que nos encontramos, que desemboca en diversos episodios de crisis. El contexto E3.0 aporta como principal elemento distintivo, una elasticidad intrínseca.

<sup>48</sup> Por ejemplo, los picos de refrigeración simultáneos en verano.

<sup>49</sup> En el pasado, los equipos de generación de calor y frío de los edificios presentaban un rendimiento a carga parcial considerablemente peor que el del plena carga, por lo que el sobredimensionado ha conducido a un innecesario despilfarro energético. Esta situación está cambiando actualmente con las nuevas generaciones de equipos de generación de frío y calor más eficientes, basados fundamentalmente en la operación a caudales y velocidades variables. Con estos nuevos equipos, las prestaciones a carga parcial mejoran respecto a las de diseño hasta llegar a estados de carga muy bajos. Sin embargo, la gran mayoría de instalaciones de generación en el sector edificación siguen sin incorporar estas tecnologías más eficientes, y en cualquier caso, el sobredimensionado sigue representando una ineficiencia económica.

<sup>50</sup> Esta aproximación tan limitada en el alcance, que no mira la globalidad sino tan solo su nicho de mercado, ha sido capaz de proporcionar los beneficios necesarios, mientras la acumulación de estos nichos no se ha acercado a las restricciones de las condiciones de contorno del sistema en el que se desarrollan.

<sup>51</sup> Buena muestra de ello son los servicios de “atención” al cliente que se han desarrollado.

<sup>52</sup> Es precisamente la inteligencia lo que permite evitar estos aspectos “negativos” de la interacción con la demanda y destapar todo su potencial de mejora de eficiencia.

<sup>53</sup> Esta probablemente sea una de las causas de más peso que han generado la gran resistencia que hemos vivido en las últimas décadas, a la entrada de las tecnologías renovables de forma significativa en los mix de generación.

<sup>54</sup> Al alcance tan solo de unos pocos.

## 2.5.2 Sistemas técnicos inteligentes

La inteligencia de los sistemas técnicos es uno de los elementos relevantes<sup>55</sup> que actúan como facilitadores de la participación activa de la demanda en la operación de dichos sistemas.

En todos los sectores del sistema energético estamos asistiendo en la actualidad a un despliegue del potencial de actuación inteligente:

- Redes eléctricas inteligentes, con capacidad de transportar y procesar información, así como de actuar para modificar dinámicamente las condiciones, y permitir una respuesta inteligente de la demanda ante las capacidades, necesidades y posibilidades de generación del sistema.
- Sistemas de transporte inteligentes, que responden directamente a las necesidades de la demanda de la forma más eficiente, proporcionando los mecanismos para que la propia demanda se adapte a las posibilidades del sistema de transporte poniendo en una balanza los requerimientos de urgencia, eficacia y coste. Estos sistemas se encuentran integrados dentro del sistema energético y participan de forma activa en su operación y regulación, responden a las posibilidades y necesidades de dicho sistema, y transmiten las señales apropiadas al demandante final de servicios, para hacerle copartícipe y responsable de la operación del sistema energético integrado.
- Edificios inteligentes, con capacidad de cubrir la demanda de servicios finales con el mínimo consumo de energía, y de establecer vínculos de comunicación bidireccional entre el sistema energético y los demandantes de servicios finales en el sector edi-

ficación, lo que contribuye, por tanto, a la integración de dicho sistema energético y a la articulación de la gestión de la demanda.

- Sistemas industriales inteligentes, que además de cubrir las necesidades con elevada eficiencia, contribuyen a la integración del sector industrial dentro del sistema energético, lo que le convierte en copartícipe del mismo.

Estos elementos de inteligencia en los sistemas técnicos ya están emergiendo entre nosotros: están disponibles. La labor adicional consiste tan solo en integrarlos correctamente dentro del contexto general, y hacer que los otros sistemas (económico, político) les acompañen y proporcionen el contexto para permitir el despliegue de todo el potencial de estas tecnologías en la articulación del proceso de cambio. Pero así como este hecho constituye un mensaje de esperanza, también debe hacernos tomar una clara conciencia del imperioso requerimiento de activación de la inteligencia en los sistemas no técnicos, y evitar pensar que los sistemas técnicos por sí solos nos resolverán la problemática actual, pues al deshacerse el espejismo nos encontraríamos en una situación peor que la actual debido al tiempo perdido.

## 2.5.3 Sistemas socioeconómicos inteligentes

Actualmente, prácticamente cualquier actuación que planteamos para encaminarnos hacia la sostenibilidad choca frontalmente con la estructura de nuestro sistema económico, y dada la fuerza predominante de éste, como motor de nuestra sociedad, las actuaciones en sostenibilidad quedan totalmente relegadas a un segundo plano, a una decoración sin capacidad alguna de cambio,

<sup>55</sup> Pero no el único, pues sin el necesario despliegue de inteligencia por los otros sistemas, la inteligencia de los sistemas técnicos puede quedar relegada a un aspecto anecdótico sin impacto real en la transición hacia el contexto E3.0.

sobre impuesta a la corriente principal que desbocada nos sigue llevando en dirección contraria a la sostenibilidad.

La única opción que parece quedarnos disponible para operar el cambio en los cortos plazos de tiempo disponibles es alinear la fuerza principal que mueve nuestra sociedad con los requerimientos de sostenibilidad, en lo que se ha dado en conocer como una economía energética basada en prestaciones. En el momento en que consigamos que el origen del beneficio económico esté íntimamente ligado a la eficiencia y ahorro energético en lugar de al despilfarro, habremos alineado la principal fuerza motora de nuestro sistema con nuestros intereses globales, y habremos liberado el principal mecanismo de introducción de cambios en escalón.

Sin la extensión de la inteligencia más allá de los sistemas técnicos, el amanecer de la inteligencia de los sistemas técnicos que actualmente estamos viviendo, nos conducirá a un gran fiasco, dadas las expectativas que estamos poniendo en ello para arreglar “todos” nuestros problemas.

En efecto, la inteligencia de los sistemas técnicos es una herramienta fundamental para afrontar los problemas a los que nos enfrentamos, pero en términos matemáticos podríamos decir que es un elemento necesario pero no suficiente para resolver las problemáticas.

De bien poco nos sirve tener una red inteligente, con capacidad de transmitir información en tiempo real y con capacidad de actuación distribuida, si la comunicación que se establece entre generadores, demanda y operador del sistema es nula, y si además seguimos con una estructura energética que, por un lado, nos hace depender de recursos no renovables, y por otro lado implementa

equipamientos no eficientes. De bien poco nos sirve desarrollar un sistema de transporte inteligente, si no se consigue articular un diálogo y participación directa de la demanda, pues los vehículos “inteligentes” se moverán por las infraestructuras “inteligentes” con factores de capacidad muy bajos y un gran despilfarro energético. Es decir: la inteligencia de los sistemas técnicos simplemente posibilita que se establezca el diálogo entre oferta y demanda para optimizar el sistema, pero en ningún modo garantiza que dicho diálogo se acabe materializando.

Un elemento fundamental para articular y hacer realidad esta comunicación bidireccional entre demanda y oferta, que posibilita el despliegue de inteligencia técnica, es que uno de los motores principales que mueve nuestra sociedad, el sistema económico, también evolucione hacia la inteligencia global.

Hasta la fecha, los mecanismos en los que hemos estructurado el sistema económico, al estar basados principalmente en la venta de cantidad de productos en lugar de en la cobertura de servicios con los mínimos recursos, son intrínsecamente muy ineficientes. Veamos un par de ejemplos sectoriales:

- En el sector edificación, el modelo de negocio establecido vende unidades de edificios sin ninguna corresponsabilidad sobre los requerimientos futuros de operación de dichos edificios. Por tanto, un promotor de un edificio no tiene aliciente económico directo<sup>56</sup> alguno en implementar medidas de eficiencia, porque sus beneficios no están relacionados con el nivel de ahorro alcanzado, sino más bien todo lo contrario: el objetivo es cómo gastar el mínimo dinero en la inversión inicial sin comprometer el precio de venta objetivo que se ha fijado en ese piso.

<sup>56</sup> Los alicientes que se están introduciendo en esta dirección son indirectos, en el sentido de que están basados en mecanismos de respuesta lenta. Un ejemplo de ello podrían ser los procedimientos de certificación energética y ambiental de los edificios.

- En el sector transporte, los fabricantes de vehículos basan su modelo de negocio en el número de unidades vendidas, independientemente<sup>57</sup> de la eficiencia con la que dichas unidades cubran la demanda de movilidad en el futuro, pues los fabricantes de los vehículos no sacan ninguna ventaja adicional de una mayor eficiencia energética. De hecho, en el contexto actual es precisamente todo lo contrario: un uso más eficiente de los vehículos al emplearlos con mayor factor de capacidad, directamente reducen sus ventas y margen de beneficio.
- Por más inteligente que sea la red eléctrica, mientras el modelo de negocio de los generadores se base directamente en la cantidad de energía vendida, y no se retribuya a los consumidores su participación activa en la operación del sistema, apartando las barreras que impedirían a la inteligencia de la red actuar sobre el dominio privado de los consumidores, la operación y regulación del sistema seguirá basada mayoritariamente en la oferta con todas sus ineficiencias asociadas.

El gran potencial de la introducción de inteligencia en el sistema económico es que permite catalizar cambios en escalón con tiempos de respuesta muy cortos, lo que modifica radicalmente la inercia y tendencia evolutiva del sistema productivo<sup>58</sup>.

Así, en el marco de un sistema económico basado en prestaciones energéticas<sup>59</sup> pueden establecerse los siguientes modelos de negocio, e introducir fuerzas determinantes en la senda que adopte nuestra sociedad:

- Edificación eficiente. El promotor se responsabiliza de los costes de operación del edificio, y vende dichos servicios más allá que el propio edificio. La generación de beneficios en su modelo de negocio pasa a

estar basada en proporcionar los servicios comprometidos con la máxima eficiencia (mínimo coste en ciclo de vida), por lo que lejos de que el sistema económico le impulse a la necesidad, o deseo, de construir el máximo número de edificios, su objetivo será construir el mínimo posible para cubrir la demanda de servicios en el mercado.

- Sistema de transporte eficiente. Basado en la venta de servicios de movilidad, tanto las compañías de servicios de movilidad, como los fabricantes de automóviles con los que las primeras pueden suscribir acuerdos estratégicos, desacoplan sus ingresos del kilometraje y del número de unidades de vehículos vendidos. Por el contrario, su incentivo está directamente vinculado a la cobertura de la demanda de movilidad con el mínimo uso de recursos, lo que potencia la producción de vehículos eficientes en el mínimo número posible, puesto que dada una demanda de servicio de movilidad sus ingresos serán los mismos independientemente del número de vehículos vendidos, lo que minimiza los gastos al reducir el número de vehículos producidos y al minimizar los consumos energéticos asociados a cubrir esa demanda de movilidad.
- Sistema eléctrico integrado y eficiente. Con los adecuados mecanismos de mercado que retribuyan al consumidor final los servicios complementarios que puede aportar al sistema eléctrico para su operación y regulación, se consigue destapar todo el potencial de la gestión y respuesta de la demanda, de tal forma que el despliegue de inteligencia (técnica y económica) alcanza su máximo beneficio potencial, liberando una ingente cantidad de recursos para operar el sistema eléctrico y valorizar la electricidad residual, lo que invierte totalmente la situación actual al desplazar el

<sup>57</sup> Siempre y cuando dicha ineficiencia no sea tan diferencial frente a otros fabricantes que les desplace del mercado. Aparte de esto, solo quedan las imposiciones de la regulación, muchas de las cuales son actualmente de carácter voluntario, por lo que todavía quedan más diluidas.

<sup>58</sup> Un primer ejemplo del potencial de cambio de los mecanismos introducidos en el sistema económico, lo hemos vivido con las FIT (Feed In Tariff), o tarifas de introducción de las energías renovables dentro del régimen especial. El dotar al sistema de una tarifa o prima asociada a la generación renovable, conduce, por un lado, a vincular el gasto asociado a la introducción de esas tecnologías directamente con su generación, lo que proporciona una garantía de resultados muy superior a lo que permite un mecanismo de apoyo basándose en subvenciones. Por otro lado, hemos asistido al hecho de que la presencia de este mecanismo de mercado ha conseguido acelerar la introducción de las tecnologías mucho más allá de lo que la mayoría pensaba, sobrepasando las expectativas de lo que se creía que podría ser viable desde el punto de vista de los ritmos de implementación comercial, hasta invertir en pocos años la situación bajo la que el resto del sector energético consideraba a las energías renovables: pasar de considerarlas una "decoración" del sistema energético sin capacidad de dar las respuestas que daban los combustibles fósiles, a entrar en pánico por ver que ya les han comido un trozo significativo de su nicho de mercado y que en poco tiempo podrían desplazarlos por completo, y pasar a desplegar una ofensiva articulada por el Ministerio de Industria encaminada a sabotear de mala manera el avance de estas tecnologías. En efecto, esto puede considerarse un cambio en escalón sobre la evolución tendencial. De hecho, el mecanismo de las FIT podría fácilmente extenderse a los negatavos (medidas de eficiencia), como mecanismo de mercado eficaz con capacidad de vincular retribución a garantías de resultados.

<sup>59</sup> Conocido en siglas anglosajonas como PBEE (Performance Based Energy Economy).

protagonismo desde el lado de la generación al de la demanda.

En (García-Casals, X., 2009) se desarrollan con más detalle líneas de negocio con algunas de las ideas arriba comentadas para concretar y cuantificar cómo se podría articular esta transición hacia el despliegue de inteligencia en el sistema económico.

Todos estos cambios potenciales en el sistema económico deben interpretarse en clave positiva, pues tenemos capacidad de implementarlos, y no solo contribuyen de forma muy significativa a articular los mecanismos que nos permitan resolver la problemática ambiental y de recursos con la que actualmente nos enfrentamos, sino que además abren vía libre para un desarrollo económico sostenible que nos aparte de las depresiones profundas a las que conduce la crisis patente del modelo actual.

Por otro lado, aunque en este informe no entraremos en este aspecto, el despliegue de inteligencia también debe abarcar al sistema social para conseguir realizar todo su potencial. Dada la estructura actual de nuestros sistemas económico y político, el gran motor de cambio que puede actuar como facilitador del despliegue de inteligencia por los sistemas político y económico es precisamente la maduración y participación activa del sistema social. Esto también es algo perfectamente a nuestro alcance, y requiriere tan solo que tomemos conciencia de nuestro papel fundamental como individuos en la definición y operación de los sistemas en los que nos organizamos<sup>60</sup>, así como de las repercusiones de nuestras actuaciones tanto a nivel local como a nivel global. En este sentido, el proceso de globalización en que vivimos también nos tiende una serie de trampas de las que debemos tomar conciencia para no caer en

ellas. Un claro ejemplo es la tendencia actual a “limpiar culpas” alistándonos a una causa global (y en muchos sentidos lejana), desatendiendo por completo las implicaciones de nuestras actuaciones a nivel local<sup>61</sup> por más que estas vayan en dirección contraria a nuestras propias pretensiones globales.

En este sentido, probablemente el principal “eslabón perdido” para articular el proceso de cambio hacia la sostenibilidad global esté en los individuos y la sociedad pasando a ser actores dominantes en la configuración y operación de los sistemas en los que estamos organizados, en lugar de dejarse arrastrar por su corriente.

### 2.5.4 Sistemas políticos inteligentes

La incorporación de inteligencia en los sistemas políticos para regular y activar los mecanismos que permitan que se extienda la inteligencia por los sistemas técnico y económico, así como para controlar el sistema administrativo, de forma que actúe coherentemente con las políticas que se pretenden impulsar, constituye una pieza fundamental en este proceso de despertar de la inteligencia global.

Evidentemente, a juzgar por la situación actual, tanto a nivel local, autonómico, nacional e internacional, y el lento avance de las negociaciones bajo el Convenio Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático, nos encontramos abismalmente lejos de esta situación. Pero como ya se ha señalado en diversas ocasiones, los políticos son completamente “renovables”, por lo que las opciones de un cambio radical en este sistema siempre están abiertas. La responsabilidad de quienes ocupan estos cargos para su servicio por y para la sociedad, así como la decidida actuación de la sociedad para exigir estas

<sup>60</sup> Primero vino el individuo, y después los sistemas en los que se organizó que fueron creados por los individuos, por mucho que la pereza y la tendencia a escurrir el bulto a menudo nos haga creer que el orden es el contrario.

<sup>61</sup> La situación de enajenamiento de la población respecto a las actividades de la administración local constituye un claro ejemplo, lo que conduce a situaciones de impunidad absoluta en la que se hace un uso del sistema administrativo para beneficio particular de unos pocos, aspecto que, de hecho, se encuentra en la raíz del origen de la mayoría de problemáticas globales a las que nos alistamos. En el mundo rural es más fácil poder identificar claramente esta situación, aunque el grueso de la población a menudo opte por mirar en otra dirección, pero también está presente en el mundo urbano, donde el gran efecto de dilución y alejamiento del sistema administrativo facilita mucho más este enajenamiento de la población.

responsabilidades son las llaves que permitirían habilitar la entrada de inteligencia global en este sistema. Por tanto, la capacidad de desarrollar un cambio en escalón en este sistema es muy elevada, pues tan solo requiere un cambio de actitud a nivel de individuo, y este puede tener lugar tan rápido como queramos una vez adquirida la conciencia de nuestra responsabilidad.

## 2.6 Electrificación del sistema energético y sus repercusiones

La integración del sistema energético es un elemento imprescindible para alcanzar los niveles de eficiencia que exigen los requerimientos de sostenibilidad. En (GP, 2007) ya analizamos este aspecto desde la perspectiva del uso eficiente de las energías renovables en el sistema eléctrico<sup>62</sup>, y en este informe profundizaremos sobre estos aspectos.

Al plantearse la integración del sistema energético, el vector electricidad aparece a su vez como un elemento fundamental para facilitar esta integración, y para permitir que el conjunto de los recursos renovables queden accesibles a las distintas aplicaciones de todos los sectores energéticos.

Por tanto, a lo largo de este informe iremos viendo cómo la electrificación<sup>63</sup> se va imponiendo en todos los sectores energéticos como elemento de eficiencia, integración y sostenibilidad. Sin embargo, este concepto, con gran peso de fondo, no debe hacer perder de vista el hecho de que la electricidad, como tal, no es más que un vector energético intermedio, y por tanto no constituye per se garantía alguna de sostenibilidad. Dicho de otra forma: la electrificación de los distintos sectores energéticos aparece como una condición necesaria pero no suficiente para la

sostenibilidad, y no debe de perder en ningún momento de vista el cómo se genera esa electricidad ni la cantidad de electricidad que se requiere generar.

### 2.6.1 La descarbonización del sistema eléctrico

La progresiva descarbonización del sistema eléctrico es un hecho contrastado que, a medida que se va desplegando, modifica la jerarquía de las tecnologías más apropiadas para cubrir distintos servicios energéticos. De hecho, la madurez y capacidad de cambio del sistema eléctrico es considerablemente superior a la de otros sistemas energéticos, por lo que es en este sistema donde vamos a asistir a una mayor velocidad de descarbonización, lo cual constituye un motivo adicional<sup>64</sup> para impulsar la electrificación de los otros sectores energéticos<sup>65</sup>.

En efecto, el coeficiente de emisiones del sistema eléctrico español en 2008 fue de 390 g CO<sub>2</sub>/kWh<sub>e</sub> (CNE, 2009), inferior para el sistema eléctrico peninsular (en torno a 325 g CO<sub>2</sub>/kWh<sub>e</sub>)<sup>66</sup>. En el año 2009 el coeficiente de emisiones para el sistema eléctrico Español ya había descendido a 270 g CO<sub>2</sub>/kWh<sub>e</sub> (CNE, 2010). La tendencia para los próximos años es a la progresiva descarbonización mediante la creciente integración de energías renovables, por lo que cabe esperar que en los próximos años asistamos a una rápida reducción del coeficiente de emisiones del sistema eléctrico.

A modo de ejemplo de las implicaciones de distintos escenarios actuales sobre la evolución prevista del coeficiente de emisiones del sistema eléctrico, en la figura 22 presentamos la evolución de dicho coeficiente de emisiones, asociado al escenario de sustitución de

<sup>62</sup> En el sentido de aprovechar la electricidad "residual" debida al requerimiento de regulación del sistema eléctrico basado en renovables, con una demanda que no participa en la operación del sistema (ciega).

<sup>63</sup> Esta electrificación incluye el potencial uso del hidrógeno producido vía electricidad de fuentes renovables como vector energético, en aquellas aplicaciones donde el valor añadido que proporcione, merced a su capacidad de acumulación, compense las penalizaciones energéticas asociadas a las pérdidas en el proceso de generación, transporte y distribución del hidrógeno.

<sup>64</sup> Motivo adicional que encaja muy bien con el requerimiento de elevado ritmo de evolución requerido en el sistema energético, pero el principal motivo para la electrificación de otros sectores energéticos es, como apuntábamos antes, la necesidad de integración y eficiencia del sistema energético.

<sup>65</sup> Siempre y cuando esta descarbonización pase por la incorporación de energías renovables en el sistema de generación, y no por la sustitución de los GEI por otros residuos, servidumbres y limitaciones como es el caso de la energía nuclear.

<sup>66</sup> Resulta interesante observar que el coeficiente de emisiones de la electricidad peninsular implementado en las herramientas de certificación energética oficiales en España es de 649 g CO<sub>2</sub>/kWh<sub>e</sub> (IDAE, 2009), totalmente alejado de los valores actuales, lo que puede contribuir a desfigurar la calificación energética de edificios, y a desplazar las soluciones adoptadas hacia mayores emisiones.

los parques de generación nuclear y fósil del sistema eléctrico peninsular, publicado en (García-Casals, X., 2009), que como podemos observar (figura 23) no difiere demasiado de los escenarios oficiales que se están manejando en países como el Reino Unido, con una carbonización actual del sistema eléctrico considerablemente superior a la nuestra (CCC, 2009). En el contexto de estos escenarios, en un plazo de tiempo muy breve, podríamos tener sistemas eléctricos con coeficientes de emisiones de GEI muy bajos, por lo que siempre y cuando la generación de esa electricidad se produzca mediante fuentes de energía renovable, la electrificación de los distintos sectores energéticos (edificación, transporte e industria) puede constituir la vía más rápida y eficiente para orientarlos hacia la sostenibilidad. A su vez, esta integración de los distintos sectores energéticos a través del vector electricidad es altamente sinérgica, en el sentido de que los diversos sectores energéticos, mediante su electrificación, pueden adquirir un importante papel activo en la regulación efectiva de la operación de un sis-

tema basado en energías renovables, al desplegar el potencial de la gestión de la demanda mediante una red inteligente.

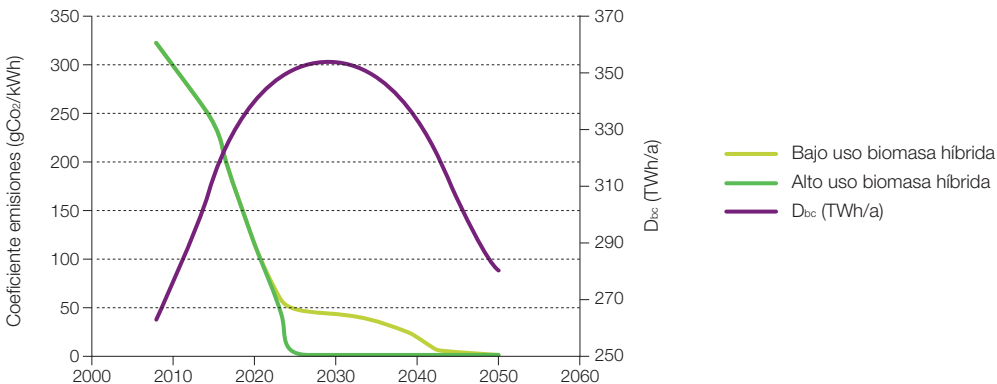
### 2.6.2 Electricidad residual

A lo largo de este informe usamos frecuentemente el término “electricidad residual” que introdujimos en el informe (GP, 2007). Con esta nomenclatura queremos poner de manifiesto una ineficiencia energética del enfoque BAU basado en la oferta y sin integración del sistema energético. El contexto E3.0 conduce precisamente a la valorización de esta electricidad residual, por lo que deja de ser un “residuo” para convertirse en un elemento importante para impulsar la eficiencia del sistema integrado.

Puesto que este concepto surge con frecuencia en los planteamientos realizados en este informe, y tiene un impacto relevante sobre diversos enfoques dentro del contexto E3.0, que rompen con algunas ideas preconcebidas

**Figura 22.** Escenario de evolución del coeficiente de emisiones de CO<sub>2</sub> del sistema eléctrico peninsular asociado a los escenarios de (García-Casals, X., 2009).

$D_{bc}$  = demanda en bornes de central.





sobre la eficiencia energética, nos ha parecido adecuado recoger en este punto algunas consideraciones sobre el término “electricidad residual”.

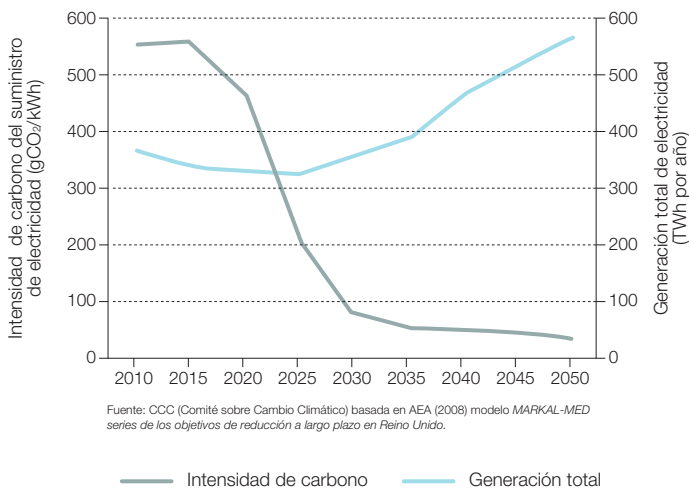
Entendemos por “electricidad residual” aquella electricidad producible con fuentes renovables no acumulables, que por motivos de regulación del sistema eléctrico no llega a producirse para adaptar la oferta a la demanda. Esta es la situación a la que con cada vez más frecuencia se enfrentan los parques eólicos en España durante las horas valles de la demanda eléctrica: el diferencial entre el nivel de demanda y la generación de las centrales rígidas del sistema, se acerca a cero, con lo que desde el operador del sistema (REE) se mandan ordenes de desconexión de los parques eólicos.

Actualmente, esta situación representa un agravio económico para los operadores de dichos parques eólicos, pues dejan de cobrar

el precio y la prima del Régimen Especial asociado a esa electricidad que dejaron de producir sin tener por ello ningún ahorro o ingreso adicional<sup>67</sup>, y comprometiendo<sup>68</sup>, por tanto, la rentabilidad de la inversión que realizaron al desarrollar esta central. En un futuro como el descrito en el informe (GP, 2007), en el que la demanda se cubre totalmente con fuentes de energía renovable desde el lado de la oferta, esta “electricidad residual” constituye una ineficiencia del sistema energético total, y por ello trae la consecuencia de un mayor coste y explotación de recursos de lo que sería necesario, para cubrir la demanda en un contexto E3.0.

En un sistema eléctrico basado en las fuentes de energía renovable, la valorización de esa gran cantidad de “electricidad residual”, vía la integración del sistema energético, apoyándose en la inteligencia, conduce a importantes cambios de paradigma en relación a cómo articular los distintos subsistemas energéticos

**Figura 23.** Escenario de evolución del coeficiente de emisiones de CO<sub>2</sub> del sistema eléctrico del Reino Unido (CCC, 2009).



**67** En efecto, en aquellas fuentes renovables distintas a la biomasa en las que el recurso de energía primaria no es acumulable o el sistema de acumulación se encuentra en su capacidad máxima (como la termosolar), el dejar de producir esa electricidad no produce ahorro alguno (no hay consumo de combustible), sino más bien lo contrario, al introducir requerimientos adicionales sobre el procedimiento de operación. Si además este servicio complementario de regulación no se retribuye, la pérdida para el operador de la central es neta.

**68** El sistema de primas a la generación del Régimen Especial está, en principio, pensado para poder proporcionar la rentabilidad suficiente al inversor como para que se desarrollen esas centrales.

para alcanzar la mayor eficiencia. En general, la tendencia principal para alcanzar la eficiencia en este contexto pasa por la electrificación a gran escala de todos los sectores energéticos (edificación, transporte e industria), modificando los planteamientos que en un contexto BAU podíamos tener sobre la eficiencia<sup>69</sup>. A lo largo de este informe desarrollamos estos cambios de paradigma en los que se apoya gran parte del contexto E3.0, y en los puntos siguientes procedemos a profundizar sobre algunos de estos aspectos desde un punto de vista conceptual.

### 2.6.3 Implicaciones para las buenas prácticas del pasado

Como apuntábamos anteriormente, la disponibilidad de un sector eléctrico abastecido fundamentalmente con energías renovables, y la posibilidad de electrificar de forma eficiente los distintos sectores energéticos, trae consigo la necesidad de replantearse lo que en el pasado se consideraban las mejores prácticas sectoriales desde el punto de vista de la eficiencia. A continuación comentamos brevemente algunos de estos puntos para mostrar la importancia que tiene el replantearse la forma de proceder del pasado a la luz del nuevo contexto.

#### 2.6.3.1 Cobertura de la demanda térmica en el sector edificación

Tradicionalmente hemos manejado la idea de que resultaba más eficiente, energéticamente hablando, el cubrir la demanda de energía térmica de los edificios mediante energía térmica<sup>70</sup> que mediante energía eléctrica. El concepto subyacente en esta idea es el bajo rendimiento con el que tradicionalmente convertíamos la energía de los combustibles

fósiles en electricidad en las centrales térmicas (30%-40%). Este concepto también es el que subyace en el planteamiento tradicional de la mayor eficiencia de la cogeneración, pues el aprovechamiento del calor residual producido en la generación de electricidad mediante combustibles fósiles (o cualquier otro combustible químico o nuclear) conduce a un ahorro de energía primaria<sup>71</sup> (y por tanto de emisiones) respecto a la opción de generar independientemente electricidad y energía térmica a partir de combustibles fósiles. Sin embargo, debemos estar dispuestos a revisar estos conceptos a la luz de la evolución de nuestro sistema energético, pues las soluciones más apropiadas para el pasado no tienen por qué ser las más adecuadas en el futuro cercano.

La elevada descarbonización que cabe esperar experimente nuestro sistema de generación eléctrica<sup>72</sup>, representa un cambio radical que nos fuerza a reconsiderar el concepto tradicional de que la generación térmica con calderas, o incluso la cogeneración, representan las soluciones más eficientes.

En efecto, el coeficiente de emisiones del sistema eléctrico español en 2008 fue de 390 g CO<sub>2</sub>/kWh<sub>e</sub> (ref CNE, 2009), inferior para el sistema eléctrico peninsular (en torno a 325 g CO<sub>2</sub>/kWh<sub>e</sub>). Ya incluso en estas condiciones, si tenemos en cuenta que una caldera de gas natural<sup>73</sup> de elevado rendimiento promedio (95 %) produce unas emisiones de 215 g CO<sub>2</sub>/kWh<sub>t</sub><sup>74</sup>, la electrificación de la demanda térmica del edificio mediante bombas de calor con unas prestaciones disponibles en el mercado español (COP = 3,5)<sup>75</sup> nos conduciría a unas emisiones de 93 g CO<sub>2</sub>/kWh<sub>e</sub> en el sistema eléctrico peninsular que, teniendo en cuenta el estándar Japonés para las bombas de calor domésticas en 2010 (COP ≈ 6,5), se podría reducir a 50 g CO<sub>2</sub>/kWh<sub>e</sub>. Y la situación

**69** Este cambio de paradigma es especialmente cierto para el caso de la demanda de energía térmica.

**70** Calderas de combustible.

**71** Cuando este ahorro de energía primaria es superior a un 10 % calificamos la cogeneración como de alta eficiencia según la Directiva 2004/8/EC.

**72** De acuerdo con la creciente penetración de energías renovables que tendremos que impulsar en los próximos años, si queremos tener opciones de estabilizar el sistema climático de nuestro planeta.

**73** Con cualquier otro combustible fósil las emisiones serían superiores.

**74** Notar la distinción entre los kWh según el tipo de forma final de energía a que se refieren. Añadimos un subíndice "e" para referir los kWh en forma de electricidad (kWh<sub>e</sub>), mientras que en las aplicaciones térmicas añadimos un subíndice "t" para indicar que se trata de energía térmica útil para cubrir la demanda correspondiente (kWh<sub>t</sub>).

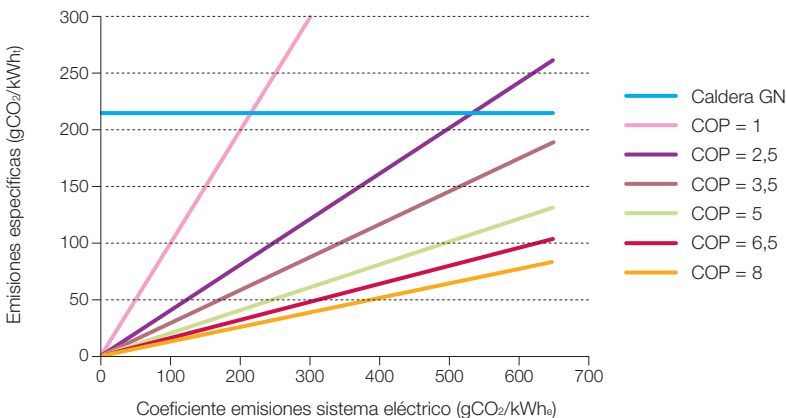
**75** COP: Coefficient Of Performance. Expresa la eficacia de una bomba de calor como cociente entre la energía térmica útil que proporciona y la electricidad que consume. El COP depende mucho de las temperaturas a las que opere la bomba de calor, y por tanto depende de la evolución de la temperatura del foco frío (ambiente exterior o terreno) que se modifica a lo largo de la estación de calefacción, y de la temperatura a la que queramos disponer de la energía térmica útil (los sistemas de distribución radiante como el suelo radiante o los muros radiantes permiten alcanzar COP mucho más elevados al distribuir la energía térmica a una temperatura del orden de la mitad de un sistema de calefacción por radiadores convencionales). En estas comparativas debe entenderse el COP indicado como el valor medio estacional.

va mejorando a medida que pasa el tiempo: en el año 2009 el coeficiente de emisiones del sistema eléctrico español ya era de 270 g CO<sub>2</sub>/kWh<sub>e</sub>, por lo que las emisiones asociadas a la producción de un kWh térmico se reducen a 77 g CO<sub>2</sub>/kWh<sub>t</sub> para COP = 3,5 y a 42 g CO<sub>2</sub>/kWh<sub>t</sub> para COP = 6,5, es decir, menos de una quinta parte de las asociadas a emplear en una caldera del alta eficiencia.

Esta situación cabe esperar que se acentúe todavía mucho más en los próximos años, en los que asistiremos a una rápida descarbonización del sistema de generación eléctrica mediante energías renovables. En la figura 24 presentamos la evolución de las emisiones específicas por unidad de energía térmica útil generada en función de la evolución de coeficiente de emisiones del sistema eléctrico. El límite superior de la escala son los 649 g CO<sub>2</sub>/kWh<sub>e</sub> que impone la certificación energética de edificios en España (CALENER) para los equipamientos que usen electricidad<sup>76</sup>. La situación actual del sistema eléctrico español

serían los 270 g CO<sub>2</sub>/kWh<sub>e</sub> anteriormente comentados. Entre las bombas de calor, incluimos lo que sería un sistema de calefacción eléctrica por efecto resistivo<sup>77</sup> puro representado por el COP = 1. El resto de valores de bombas de calor representarían el rango de opciones de mercado en España para las bombas de calor aerotérmicas (COP = 2,5-3,5), una bomba de calor del orden de lo que nos podría aportar una buena bomba de calor geotérmica (COP = 5), el estándar actual para bombas de calor aerotérmicas en Japón (COP = 6,5), y lo que podríamos considerar una prospectiva tecnológica de lo que nos pueden aportar las bombas de calor (COP = 8). Como podemos observar, incluso para un sistema eléctrico muy carbonizado (650 g CO<sub>2</sub>/kWh<sub>e</sub>) las bombas de calor pueden suponer una mejora respecto a la caldera de GN siempre que empleemos equipos con COP ≥ 3. Pero en las condiciones actuales de nuestro sistema eléctrico (270 g CO<sub>2</sub>/kWh<sub>e</sub>) las prestaciones de todas las bombas de calor indicadas resultan tremendamente ventajosas respecto a las de

**Figura 24.** Comparativa de las emisiones específicas asociadas a la generación de energía térmica útil, entre una caldera de gas natural eficiente (95% rendimiento estacional) y bombas de calor con distinto COP.



**76** Este valor tan alejado de la realidad decanta los diseños por elegir tecnologías menos eficientes desde el punto de vista de las emisiones, al otorgarles una mejor calificación energética: éste es uno de los diversos ejemplos que ilustran cómo un procedimiento de certificación incorrectamente implementado actúa empujando al mercado en la dirección contraria a la requerida, por lo que más allá de constituir un mecanismo de respuesta lenta, puede degenerar en un mecanismo indeseado.

**77** Efecto Joule.

una caldera de gas. Es más, a partir del momento en el que el coeficiente de emisiones del sistema eléctrico alcance los 215 g CO<sub>2</sub>/kWh<sub>e</sub>, incluso las calefacciones eléctricas por efecto resistivo puro pasarán a ser mejores desde el punto de vista de emisiones que la caldera de gas. Y en un contexto con elevada penetración renovable (coeficiente de emisiones del sistema eléctrico tendiendo a cero) todas las opciones eléctricas (incluyendo la resistiva pura) tienden a unas emisiones específicas nulas para producir la energía térmica requerida.

De hecho, las bombas de calor hay que entenderlas como tecnologías que aprovechan energía térmica de origen renovable<sup>78</sup> (solar para ser más precisos) almacenada en el aire (bombas aerotérmicas), o en la tierra (bombas de calor geotérmicas). En efecto, en una bomba de calor con COP = 4, que trabaja en modo calor, ¾ partes de la energía térmica aportada provienen de energía renovable (solar), y el ¼ restante proviene de la electricidad consumida por la bomba de calor, que a su vez tiene una contribución renovable que irá creciendo rápidamente a lo largo de los próximos años. Al ir aumentando el COP de las bombas de calor, crece la aportación renovable local, y al ir reduciéndose el coeficiente de emisiones del sistema eléctrico, desarrolla la aportación renovable “centralizada”<sup>79</sup>. Eventualmente, al alcanzar un sistema de generación eléctrica 100% renovable, el aporte de energía térmica a los edificios equipados con bombas de calor (para calefacción, refrigeración y agua caliente sanitaria (ACS)) sería 100% renovable.

Por tanto, vemos cómo al sector de la edificación se le abre no solo una, sino todo un abanico de opciones de alcanzar en los próximos años una integración del 100% de renovables para cubrir su demanda energética.

La primera batería de herramientas a implementar son sin duda las de eficiencia energética y bioclimatismo, es decir, medidas encaminadas a reducir la demanda de energía final del edificio. Y para el remanente de la demanda energética del edificio, aquella que haya que aportar de forma activa, se abren dos<sup>80</sup> vías de satisfacer esta demanda energética: sistemas descentralizados de energías renovables de origen térmico, y electrificación con bombas de calor que se apoyen en un sistema eléctrico centralizado cuya generación esté basada en energías renovables.

Cuál de estas dos vías se imponga depende de varios factores, entre los cuales, en primera instancia, podríamos citar los dos siguientes:

- Sinergias entre los distintos servicios energéticos a cubrir. En este sentido hay que tener en cuenta que a medio plazo, una vez aplicadas las medidas de eficiencia energética, los servicios energéticos de climatización del edificio (calefacción y refrigeración) van a ceder su actual protagonismo sobre la demanda energética total del edificio a otros servicios que forzosamente tienen que satisfacerse vía eléctrica (iluminación, equipamiento, bombas, ventiladores, etc.). En estas condiciones, el emplear el mismo vector energético (la electricidad) para cubrir las demandas energéticas de climatización, ofrece ventajas logísticas respecto a la opción de introducir nuevos vectores energéticos.
- Costes económicos de las distintas opciones. En el marco de mercado libre, las opciones de menor coste se imponen a las de costes superiores. En este aspecto, la opción eléctrica basada en bombas de calor eficientes y un sistema eléctrico centralizado abastecido por energías renovables tiene todos los puntos para resultar económicamente más favorable<sup>81</sup> que los sistemas

<sup>78</sup> Y así lo refleja la Directiva 2009/28/CE relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables. Esta directiva contabiliza como aporte renovable de una bomba de calor la cantidad de calor ambiente movilizad por la misma, e introduce un requisito adicional de eficacia estacional mínima de la bomba de calor para que pueda contabilizarse su aporte renovable (el COP estacional debe ser superior a 1.15/η, y es η el rendimiento bruto de producción de energía eléctrica promedio de la UE).

<sup>79</sup> El término “centralizado” debe interpretarse aquí como “procedente de la red eléctrica”, pero no implica ningún posicionamiento sobre la participación de la generación distribuida en dicha red eléctrica.

<sup>80</sup> Y todas las combinaciones posibles entre ambas.

<sup>81</sup> En (García-Casals, X., 2006) puede encontrarse un estudio específico para el caso de los sistemas de refrigeración solar.

basados en energías renovables térmicas descentralizados.

Pero adicionalmente a estos factores, en un futuro muy próximo y asociados al desarrollo de las redes inteligentes, pueden aparecer factores adicionales tales como los mecanismos de mercado asociados a la gestión de la demanda, que hagan que la opción de electrificación completa del sector residencial resulte todavía más interesante y favorable frente a las opciones de energías renovables térmicas distribuidas.

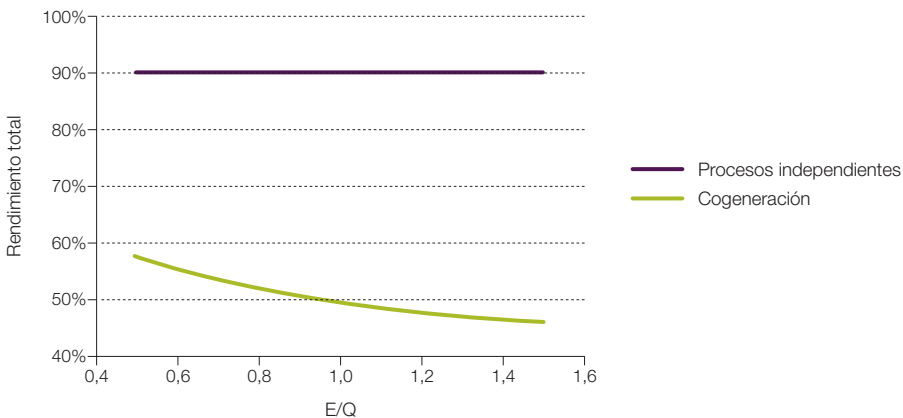
### 2.6.3.2 Cogeneración

Tradicionalmente hemos considerado la cogeneración<sup>82</sup> o trigeneración<sup>83</sup> como un elemento ejemplar de eficiencia energética. Sin embargo, este concepto está estrechamente ligado a la forma convencional con la que producíamos electricidad y energía térmica final (calor y frío). En efecto, cuando la producción

de electricidad se basa principalmente en la conversión termoeléctrica de combustibles fósiles, y la producción de energía térmica final en la combustión directa de estos mismos combustibles, la cogeneración adquiere todo su sentido desde el punto de vista de la eficiencia para evitar el despilfarro de los combustibles fósiles.

La figura 25 nos ilustra este hecho. En esta figura, comparamos el rendimiento total del aprovechamiento del combustible fósil alcanzado al producir por un lado la electricidad (con un rendimiento del 35%), y por otro el calor (con un rendimiento del 85%), con el rendimiento total alcanzado al cubrir la demanda de electricidad y calor, con una cogeneración en la que el rendimiento eléctrico del motor térmico se ha ajustado para proporcionar la relación electricidad / calor (E/Q) necesaria en cada caso, con unas pérdidas totales de la cogeneración del 10%, y bajo la hipótesis de que todo el calor residual producido puede aprovecharse, todo ello en función de

**Figura 25.** Rendimiento total asociado al uso de combustible para producir electricidad con 35% de rendimiento y calor con 85% de rendimiento, comparado con el de una cogeneración de rendimiento total igual al 90%.



<sup>82</sup> Producción simultánea de electricidad y calor.

<sup>83</sup> Producción simultánea de electricidad, calor y frío.

la relación entre la demanda de electricidad y la de calor. Como podemos observar, existe una gran diferencia entre los rendimientos totales obtenidos por ambos métodos de cubrir las demandas de electricidad y calor en todo el rango de  $E/Q$ <sup>84</sup>, y este es precisamente el motivo por el cual tradicionalmente hemos considerado la cogeneración como la abandonada de la eficiencia energética.

Evidentemente, las condiciones reales no son tan ideales como las que muestra la figura anterior. Por un lado está el hecho de que no tenemos a nuestra disposición un continuo de motores térmicos cuyo rendimiento eléctrico se adapte perfectamente al requerimiento de la estructura de la demanda ( $E/Q$ ), por lo que el motor que acabamos usando en cada caso no es el ideal.

Otro elemento importante que empeora el comportamiento energético de la cogeneración es que a menudo no es posible aprovechar todo el calor residual producido en la generación de electricidad debido a que el acoplamiento de la demanda térmica y la capacidad de generación térmica asociada a la producción de electricidad, no es perfecto<sup>85</sup>.

Pero además de todo lo anterior, en un sistema eléctrico con bajo coeficiente de emisiones (por introducción de renovables), y empleando equipamiento eficiente<sup>86</sup>, la cogeneración puede incluso perder su sentido desde el punto de vista de la eficiencia energética por dejar de proporcionar ahorros de energía primaria.

En lo que sigue procedemos a justificar la afirmación del párrafo anterior, poniendo encima de la mesa los argumentos cuantitativos que nos obligan a replantearnos el papel de la cogeneración en un contexto E3.0, pasando de considerarla como uno de los estándares de

la eficiencia energética a verla como una tecnología que probablemente no adquiera un gran protagonismo en el marco de un sistema energético eficiente y basado en las energías renovables.

### Indicadores de eficiencia de la cogeneración

En el campo de la cogeneración se emplean distintos indicadores para caracterizarla energéticamente<sup>87</sup>, lo cual genera cierta confusión en relación a la eficiencia real de esta tecnología. Uno de ellos<sup>88</sup> es el empleado en el RD 661. La Directiva 2004/8/CE, para caracterizar la cogeneración de alta eficiencia, emplea otro indicador<sup>89</sup>.

A continuación presentamos los distintos indicadores empleados. De todos ellos solo dos son independientes, es decir, basta con proporcionar dos de ellos (por ejemplo  $E/Q$  y  $\eta_{tot}$ ) para que queden determinados todos los demás.

A menudo se emplea alguno de estos indicadores para marcar la barrera entre lo que se considera cogeneración de alta eficiencia y lo que no<sup>90</sup>. Pero incluso en las condiciones actuales conviene hacer un análisis crítico de lo que consideramos cogeneración de alta eficiencia.

En la Directiva 2004/8/CE se define como cogeneración de alta eficiencia aquella que proporcione un ahorro de energía primaria (PES)  $\geq 10\%$  pero, para el caso de la microcogeneración ( $P_e < 50 \text{ kW}_e$ ) y la cogeneración de pequeña escala ( $P_e < 1 \text{ MW}_e$ ), esta condición se relaja hasta PES  $\geq 0\%$ , es decir, se define en este caso la cogeneración de “alta eficiencia” como aquella que no represente una pérdida de energía primaria.

<sup>84</sup> La ventaja es mayor al crecer  $E/Q$ , pero hace falta emplear un motor térmico de mayor rendimiento para acoplarse a ese ratio entre las demandas eléctrica y térmica a medida que aumenta  $E/Q$ .

<sup>85</sup> En este sentido resulta ilustrativo analizar la estructura del RD 661 para el régimen especial, dentro del cual se engloba la cogeneración. En principio, la cogeneración que recibe prima por su generación eléctrica es la denominada de alta eficiencia, que en el marco del RD 661 se plasma en la exigencia de un rendimiento eléctrico equivalente mínimo (REE: ver más abajo). Pero para el caso de las aplicaciones en el sector edificación, y debido precisamente a la mayor dificultad de acoplar correctamente la demanda térmica con la capacidad de generación térmica asociada a la producción eléctrica, esta exigencia se relaja, y no exige en la práctica el cumplimiento de ningún valor del REE mínimo.

<sup>86</sup> Por ejemplo, bombas de calor de buenas prestaciones.

<sup>87</sup> En (García-Casals, X., 2003) se encuentra un análisis del tipo de indicadores a usar para caracterizar la cogeneración desde la perspectiva de sostenibilidad.

<sup>88</sup> REE: Rendimiento eléctrico equivalente.

<sup>89</sup> PES: Ahorro de energía primaria.

<sup>90</sup> En la pequeña cogeneración ( $P_e < 1 \text{ MW}_e$ ), los límites para definir la alta eficiencia (tanto en RD 661 como en Directiva 2004/8/CE) se relajan.

Para el caso del RD 661 se considera cogeneración de alta eficiencia (para poder acogerse al régimen especial) aquella que alcance un valor mínimo del promedio anual del REE, que por ejemplo para la cogeneración con motores térmicos y gas natural es del 55%, y se relaja la exigencia para  $Pe \leq 1 \text{ MW}_e$  hasta 49,5% en este caso, que ya es inferior al rendimiento de un ciclo combinado para producción de electricidad, y se elimina por completo la exigencia para el caso de aplicaciones en el sector edificación.

Algunos de los indicadores empleados hay que tomarlos con pinzas, pues son indicadores parciales que contemplan solo una parte de la realidad del proceso global de cogeneración, por lo que según los valores adoptados pueden carecer de sentido. Este es el caso de los rendimientos equivalentes REE<sup>91</sup> y RTE. Por ejemplo, el REE tiende a infinito cuando el rendimiento eléctrico de referencia tiende al cociente entre electricidad producida y fuel consumido ( $REE \rightarrow \infty$  para  $\eta_{e,ref} \rightarrow E/F$ ), y el rendimiento térmico equivalente tiende a infinito cuando el rendimiento de referencia en generación de calor tiende al cociente entre calor útil producido y combustible consumido ( $RTE \rightarrow \infty$  para  $\eta_{h,ref} \rightarrow Q/F$ )<sup>92</sup>.

Un elemento fundamental en la evaluación del grado de eficiencia de la cogeneración son las tecnologías de comparación que se emplean para la producción por separado de electricidad y calor. Según las tecnologías de comparación que se empleen, la cogeneración puede resultar ventajosa o no desde el punto de vista del ahorro de energía primaria, y en el marco de este estudio en el que se considera la evolución del sistema energético desde un contexto BAU a un contexto E3.0, si algo cambia de forma radical son las tecnologías de comparación. Por tanto, una cogeneración que podría estar justificada desde un punto

de vista de eficiencia energética en un contexto BAU, puede pasar a estar totalmente injustificada desde esa perspectiva en un contexto E3.0.

Las tecnologías de comparación se definen por los rendimientos de referencia de generación de calor<sup>93</sup> ( $\eta_{h,ref}$ ) y electricidad<sup>94</sup> ( $\eta_{e,ref}$ ), y evolucionan a lo largo del tiempo<sup>95</sup>.

A continuación recogemos la expresión de distintos parámetros empleados para caracterizar energéticamente la cogeneración:

$$\eta_{tot} = \frac{E+Q}{F}$$

$$REE = \frac{E}{F} \cdot \frac{Q}{Q_{ref}} = \frac{EQ}{FQ_{ref}}$$

$$RTE = \frac{Q}{F} \cdot \frac{E}{E_{ref}} = \frac{EQ}{FE_{ref}}$$

$$PES = 1 - \frac{1}{\frac{Q_{ref}}{Q} + \frac{E_{ref}}{E}} = 1 - \frac{F}{\frac{Q}{\eta_{h,ref}} + \frac{E}{\eta_{e,ref}}} = \frac{F_{ref} - F}{F_{ref}}$$

$$\eta_h = \frac{Q}{F} \quad ; \quad \eta_e = \frac{E}{F}$$

Siendo:

E: Producción de electricidad.

F: Consumo de combustible.

$\eta_e$ : Rendimiento eléctrico.

$\eta_{e,ref}$ : Rendimiento eléctrico de referencia (también Ref E).

$\eta_h$ : Rendimiento térmico.

$\eta_{h,ref}$ : Rendimiento térmico de referencia (también Ref H).

$\eta_{tot}$ : Rendimiento total.

Q: Producción de calor.

REE: Rendimiento eléctrico equivalente.

RTE: Rendimiento térmico equivalente.

PES: Ahorro de energía primaria.

<sup>91</sup> El REE, tal y como hemos comentado anteriormente, es el indicador empleado por la regulación española (RD 661).

<sup>92</sup> En estas expresiones, la flecha ( $\rightarrow$ ) significa: "tiende a", y el símbolo  $\infty$  significa "infinito". Más abajo se aclara la definición de los distintos términos referidos en esta afirmación.

<sup>93</sup> En nomenclatura de la Directiva 2004/8/CE y del RD 661 este rendimiento se expresa como Ref H.

<sup>94</sup> En nomenclatura de la Directiva 2004/8/CE y del RD 661, este rendimiento se expresa como Ref E.

<sup>95</sup> Actualmente estos rendimientos de referencia se encuentran fijados a nivel comunitario en la Decisión de la Comisión de 21 de diciembre de 2006 (2007/74/CE) como los valores de eficiencia armonizados para la producción por separado de electricidad y calor. Por ejemplo, para la producción de electricidad, se establece un valor de estos rendimientos hasta el año 2011 del 52,5% al usar gas natural, y del 25% al usar biomasa. Para el caso de la producción de calor con gas natural, se establece un valor del 82%.

Dado que REE y RTE pueden tender a infinito, no resultan indicadores adecuados para analizar la eficiencia energética de la cogeneración. El indicador adecuado para este análisis es el PES con unos  $\eta_{h,ref}$  y  $\eta_{e,ref}$  correspondientes al sistema alternativo de producir Q y E con el fuel empleado para la cogeneración<sup>96</sup>.

### Procesos de comparación

Como ya hemos comentado, los procesos de comparación para generación de calor y electricidad son un elemento fundamental para evaluar la eficiencia de la cogeneración desde el punto de vista del ahorro de energía primaria que proporciona. En la regulación nacional y comunitaria (Directiva 2004/8/CE y RD 661) se emplean unos valores de los rendimientos energéticos de los procesos de comparación<sup>97</sup> que pretenden ser representativos de la situación actual, por lo que respecta a las tecnologías a las que sustituye la cogeneración. Pero estos procesos de comparación de referencia usados por la regulación actual pueden resultar totalmente inapropiados para evaluar la eficiencia energética de la cogeneración en un contexto distinto, como es incluso el contexto BAU en 2050, pero muy especialmente el contexto E3.0. En efecto, el cambio de planteamiento en el contexto E3.0 es tan radical respecto a la situación actual, que los procesos de comparación actuales no proporcionan ninguna indicación del impacto real de la cogeneración desde el punto de vista del ahorro de energía primaria.

Habitualmente, los procesos de comparación se definen partiendo de la base que se empleara para el mismo combustible en la cogeneración que en los procesos de referencia<sup>98</sup>. En estas condiciones, el ahorro de

energía primaria se obtiene al comparar el combustible empleado en la cogeneración para cubrir las demandas de electricidad (E) y calor (Q) con el rendimiento total de la cogeneración<sup>99</sup>:

$$F \rightarrow \eta_{tot} \rightarrow E \& Q$$

Con el combustible que sería preciso emplear para cubrir estas demandas basándose en los rendimientos de referencia de producción de electricidad y calor:

$$F_e = E/\eta_{e,ref} \rightarrow E$$

$$F_q = Q/\eta_{h,ref} \rightarrow Q$$

$$F_{ref} = F_e + F_q$$

En el caso de emplear una bomba de calor alimentada con electricidad como proceso de referencia, tecnología extensamente empleada en el contexto E3.0, en el caso de que la electricidad empleada por la bomba de calor proceda de una central termoeléctrica alimentada por un combustible<sup>100</sup>, hay parte del combustible de dicha central que se pierde por no cogenerar, pero a cambio, en el punto de uso final, se emplea calor de origen solar del ambiente por estar usando una bomba de calor. De alguna forma puede considerarse como que ese calor que se pierde en la central termoeléctrica se recupera con creces en el punto de consumo a través del calor ambiente. De hecho, el calor útil obtenido por aprovechamiento del calor ambiente que nos proporciona la bomba de calor es, por lo general, muy superior al calor útil obtenido mediante la cogeneración, pero en la cogeneración además se obtiene electricidad. El balance completo lo expresa el PES de la cogeneración empleando como procesos de comparación el rendimiento del sistema eléctrico (mejora al aumentar penetración renovables) y el de producción de calor con bomba calor a partir del combustible

<sup>96</sup> En el caso de emplear bombas de calor para la producción de calor como sistema de referencia, tendríamos  $\eta_{h,ref} = COP \times \eta_{e,ref}$ . Se puede añadir el efecto pérdidas T&D tal y como hace la Directiva mediante la reducción del rendimiento eléctrico de referencia.

<sup>97</sup> Cabe pensar en dos opciones de proceso de comparación: la tecnología a la que sustituye la cogeneración desarrollada, o la media del sistema energético actual. La regulación energética actual considera la segunda de estas opciones.

<sup>98</sup> Lo cual ya constituye una restricción importante a la hora de evaluar el efecto neto sobre el ahorro de energía primaria, pues los procesos de referencia reales, es decir, aquellos que se emplearían si no se cogenerara, pueden hacer uso de combustibles o tecnologías energéticas distintas.

<sup>99</sup> Las flechas en las expresiones siguientes significan: "tiene a".

<sup>100</sup> Lo cual podría aplicar a un contexto BAU, pero no a uno E3.0.



( $\eta_{e,ref.COP}$ ). En el caso de la producción de frío, la comparativa todavía es más favorable al proceso vía bomba calor, pues con la trigeneración, la máquina absorción puede tener  $COP < 1$  (aprovecha menos calor residual que para producir calor)<sup>101</sup>.

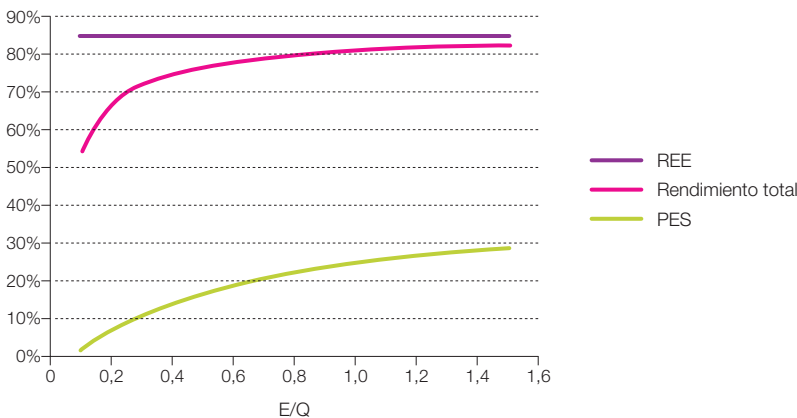
Pero como comentábamos anteriormente, la restricción de imponer en los procesos de comparación que se emplee el mismo combustible para generar la electricidad que el usado en la cogeneración, es excesiva, y resulta inapropiada para el análisis en un contexto global (como es el E3.0). En efecto, incluso en el contexto actual la electricidad se produce de forma creciente con fuentes de energía renovable no combustibles, y en el contexto E3.0 prácticamente toda la electricidad se produce sin emplear combustibles. En estas condiciones, el  $\eta_{e,ref}$  tiende al 100%, lo que hace que la cogeneración cada vez resulte menos ventajosa, hasta el punto de que la cogeneración incluso llegue a resultar negativa ( $PES < 0\%$ ).

### Variaciones tipo de los parámetros que caracterizan la eficiencia de la cogeneración

Para ilustrar los comentarios anteriores, recogemos a continuación los rangos de variación tipo de los distintos parámetros empleados para caracterizar energéticamente a la cogeneración.

La figura 26 nos muestra la variación de los parámetros que caracterizan energéticamente la cogeneración para unos procesos de comparación que podríamos considerar representativos de la situación actual ( $\eta_{h,ref} = 90\%$  y  $\eta_{e,ref} = 50\%$ )<sup>102</sup> al emplear una instalación de cogeneración con un rendimiento total del 85%, y en función de la estructura de la demanda energética caracterizada por su relación electricidad / calor<sup>103</sup>. Como podemos observar, en estas condiciones el PES se mantiene positivo en todo el rango de estructuras de demanda consideradas, y llega a alcanzar valores superiores al 20

**Figura 26.** Variación de los distintos indicadores energéticos de una REE con 85 % de rendimiento total con la estructura de la demanda (E/Q) cuando se emplean como procesos de comparación  $\eta_{h,ref} = 90\%$  y  $\eta_{e,ref} = 50\%$ .



**101** Una máquina de absorción de simple efecto tiene  $COP = 0,7$ , mientras que una máquina de doble efecto nos proporciona  $COP = 1,3$ .

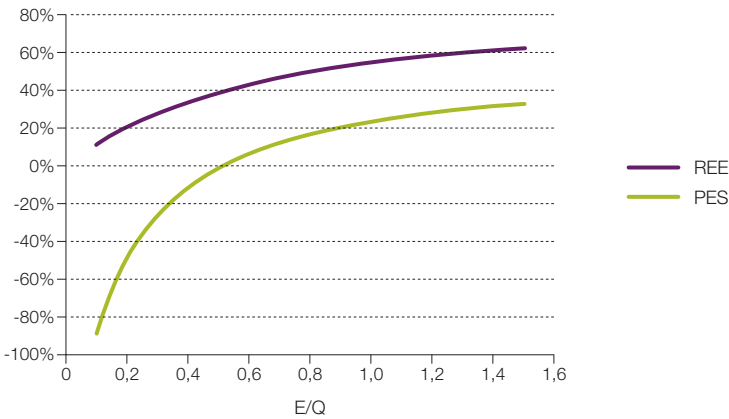
**102** Nótese que estos valores, a pesar de ser representativos de la situación actual, son algo superiores a los que impone la regulación actual (2004/8/CE y RE661), lo cual hace que la regulación tienda a sobrevalorar los beneficios energéticos de la cogeneración.

**103** Al igual que en el caso anterior, se asume una cogeneración ideal en el sentido de que para cada valor de E/Q la estructura de la generación del motor térmico empleado se acopla perfectamente a la demanda.

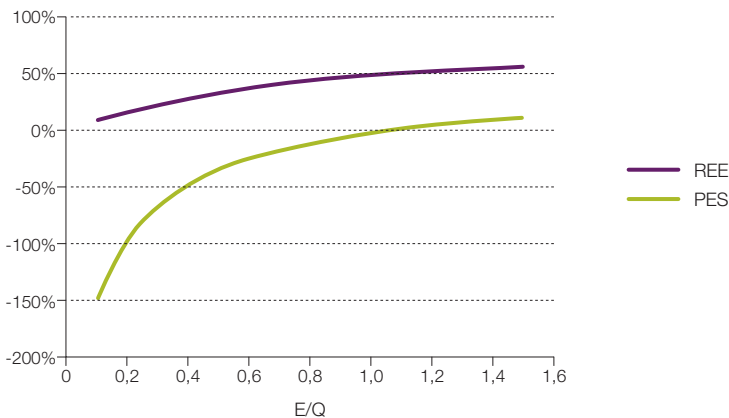
% para valores elevados de E/Q. En estas condiciones, la cogeneración realmente constituye una tecnología energéticamente eficiente en relación a los procesos de comparación empleados.

En la figura 27 presentamos los resultados correspondientes a la introducción de bombas de calor eficientes<sup>104</sup> como tecnología de comparación para la producción de calor<sup>105</sup>. Incluso en el caso del ejemplo anterior, en el que

**Figura 27.** Variación del REE y el PES de una cogeneración con 90% de rendimiento total en función de la estructura de la demanda (E/Q) cuando se emplean como procesos de comparación  $\eta_{e,ref} = 40\%$  y bombas de calor con COP = 6,32.



**Figura 28.** Variación del REE y el PES de una cogeneración con 85% de rendimiento total en función de la estructura de la demanda (E/Q) cuando se emplean como procesos de comparación  $\eta_{e,ref} = 50\%$  y bombas de calor con COP = 6,32.



**104** La bomba de calor que consideramos en estos ejemplos, con un COP = 6,32, es considerablemente más eficiente que las bombas de calor domésticas que encontramos actualmente en el mercado español, pero se corresponde con el estándar japonés de bombas de calor domésticas para 2010 (si bien aquí consideramos ese COP como valor medio estacional), y por tanto es indicativo de la tecnología eficiente actualmente disponible. En España, el RD 142/2003 es el que regula el etiquetado energético de los acondicionadores de aire de tipo doméstico, y para los equipos refrigerados por aire (sistemas aire-aire) asigna la clase-A para COP > 3,6 en el caso de equipos *split*, para COP > 3,4 para equipos compactos, y para COP > 3,0 para equipos de conducto único. En el caso de plantearse el uso de refrigeradoras centralizadas por bloque o por distrito, en configuraciones agua-agua, sería posible acceder a COP > 7 (algunas enfriadoras eficientes, a carga parcial, ya alcanzan COP > 10).

**105** Nótese que, en estas condiciones, el rendimiento de referencia de la producción de calor es de  $\eta_{e,ref} = 253\%$ .

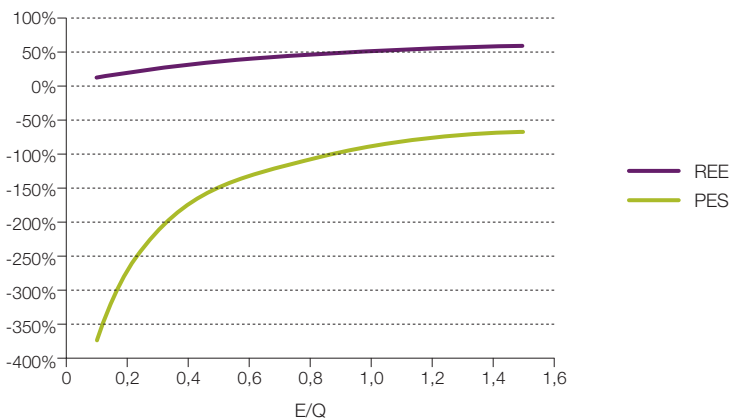
mejorara el rendimiento total de la generación hasta alcanzar el 90%, y empeorara el rendimiento del proceso de comparación para la generación eléctrica hasta el 40%, esta figura nos muestra cómo para valores de  $E/Q$  inferiores al 50%, el ahorro de energía primaria que nos proporciona esta cogeneración se hace negativo. Para el caso<sup>106</sup> de mantener los mismos valores que en el ejemplo anterior ( $\eta_{e,ref} = 50\%$  y  $\eta_{tot} = 85\%$ ), la figura 28 nos muestra cómo el PES es negativo para  $E/Q < 1$ , es decir, prácticamente para cualquier caso. En este contexto, la cogeneración en raras ocasiones resulta ventajosa desde el punto de vista de la eficiencia energética, por lo que en general no la podremos considerar como una tecnología eficiente. Y para el caso de que tengamos un sistema eléctrico basado en energías renovables distintas de la biomasa, con un  $\eta_{e,ref} = 100\%$ , incluso con una cogeneración de  $\eta_{tot} = 90\%$ , la figura 29 nos muestra cómo de negativa resulta la cogeneración en términos de energía primaria para todo el rango de  $E/Q$ .

Pero es más, incluso en el contexto BAU la penetración de renovables en el sistema eléctrico irá aumentando con el tiempo, y en el contexto E3.0 esta penetración de las renovables será mucho más rápida, de tal forma que la práctica totalidad de electricidad se producirá a partir de fuentes renovables<sup>107</sup> no combustibles, con lo que el  $\eta_{e,ref}$  tenderá a infinito<sup>108</sup>. A medida que aumenta el  $\eta_{e,ref}$ , el PES proporcionado por una cogeneración va reduciéndose, por lo que a partir de una cierta integración de renovables en la red, la cogeneración resultará una tecnología negativa desde el punto de vista de la eficiencia energética por proporcionar  $PES < 0$  tal y como nos muestra la figura 30. En efecto, para una cogeneración de 90% de rendimiento total, cuando el proceso de referencia para la producción de calor es una bomba de calor eficiente ( $COP = 6,3$ ), a partir de un rendimiento eléctrico de referencia de  $\eta_{e,ref} \approx 50\%$  la cogeneración ya no tendría sentido<sup>109</sup> desde el punto de vista de la eficiencia. Para el caso de emplear una

**106** Nótese que, en estas condiciones, el rendimiento de referencia de la producción de calor es de  $\eta_{e,ref} = 316\%$ .

**107** Es de notar que la definición del rendimiento del sistema eléctrico para el caso de las renovables distintas a la biomasa es un tanto artificial. En efecto, para los casos de los combustibles fósiles o de la biomasa, el rendimiento se define empleando para el denominador la energía química contenida en el combustible, que constituye ya el recurso energético procesado del que disponemos al iniciar el proceso de transformación dentro del sistema energético. Sin embargo, para tecnologías como la eólica o las solares, se suele considerar la electricidad generada a partir de dichos recursos energéticos renovables como el recurso energético ya procesado que introducimos en el sistema energético. Evidentemente podríamos remontarnos más arriba en la cadena de transformaciones energéticas de esos recursos renovables, pero carece de sentido práctico. En efecto, si consideramos la eólica, podríamos tomar como denominador la energía mecánica contenida en el viento que es del orden del doble de la electricidad producida por el aerogenerador (aunque esto no se puede interpretar como una pérdida, porque si el rotor del aerogenerador frenara completamente al viento, la potencia extraída sería nula, esto que dejaría de fluir viento por el rotor), o bien la energía solar que en origen dio lugar a esa energía mecánica contenida en el viento, con lo que la "eficacia" del proceso de conversión sería todavía mucho más bajo, o bien yendo más lejos, la energía nuclear original que en el sol dio lugar a la radiación solar que generó la energía mecánica del viento, con lo que la "eficacia" todavía sería mucho más baja. Pero ninguna de estas "eficacias" tienen sentido práctico alguno, pues el recurso energético procesado que nosotros introducimos en el sistema energético es la electricidad producida por el aerogenerador. En el caso de la biomasa, el rendimiento de conversión de la misma que consideramos tiene como denominador la energía química contenida en la biomasa original, que es lo que consideramos energía primaria introducida en el sistema energético y por tanto el

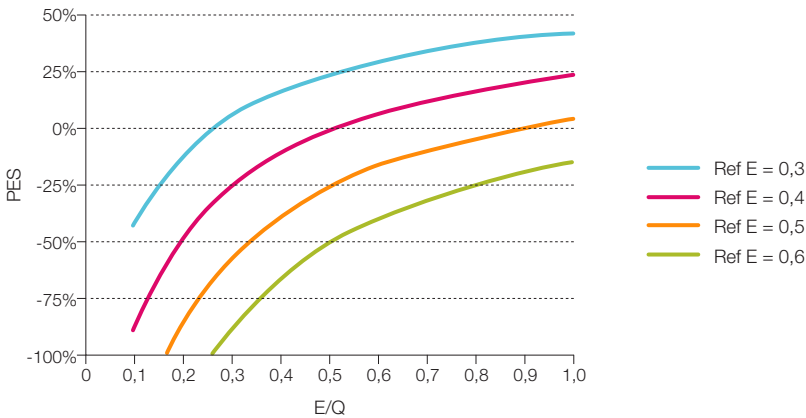
**Figura 29.** Variación del REE y el PES de una cogeneración con 90% de rendimiento total en función de la estructura de la demanda ( $E/Q$ ) cuando se emplean como procesos de comparación  $\eta_{e,ref} = 100\%$  y bombas de calor con  $COP = 6,32$ .



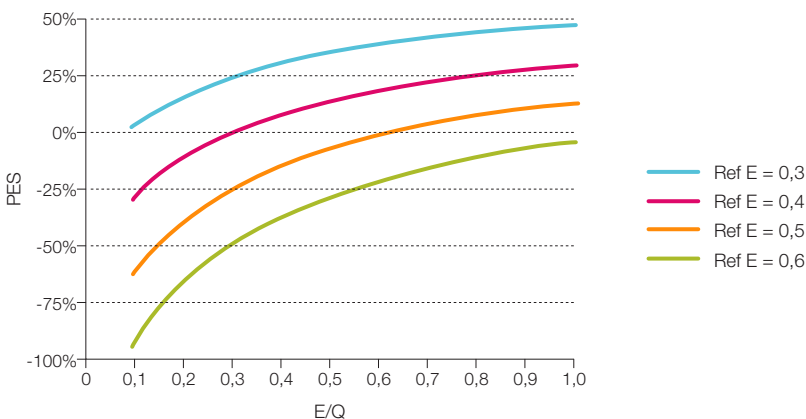
bomba de calor menos eficiente, como las actualmente disponibles en el mercado español<sup>110</sup>, la situación es un poco más favorable para la cogeneración, pero la conclusión principal es la misma, pues tal y como

nos muestra la figura 31 la cogeneración carece de sentido desde un punto de vista energético a partir de  $\eta_{e,ref} \approx 60\%$  para cualquier aplicación, y a partir de  $\eta_{e,ref} \approx 50\%$  para muchas aplicaciones.

**Figura 30.** Efecto del rendimiento eléctrico de referencia ( $\eta_{e,ref}$ ) sobre el ahorro de energía primaria producido por una cogeneración con rendimiento total del 90%, al usar como proceso de referencia para la generación de calor una bomba de calor con COP = 6,3.



**Figura 31.** Efecto del rendimiento eléctrico de referencia ( $\eta_{e,ref}$ ) sobre el ahorro de energía primaria producido por una cogeneración con rendimiento total del 90%, al usar como proceso de referencia para la generación de calor una bomba de calor con COP = 3,6.



recurso energético cuyas eficiencias de transformación hay que perseguir. Pero en origen, esa biomasa es la radiación solar, que con un rendimiento del orden del 0,5% se convierte en biomasa, por lo que si siguiéramos aguas arriba el proceso de transformación energética, el rendimiento que adoptaríamos para la transformación eléctrica de la biomasa sería muy inferior al que consideramos. Y con los combustibles fósiles pasa exactamente lo mismo, pues en origen provienen de la biomasa, pero con un rendimiento aguas arriba de la energía química almacenada en el combustible inferior a los de la biomasa.

**108** El  $\eta_e$  del sistema eléctrico tenderá al 100% si adoptamos como denominador la energía eléctrica aportada por las tecnologías renovables (excluyendo la biomasa vía termoelectrónica, cuyo rendimiento sería inferior), pero tenderá a infinito si el denominador es el combustible fósil, que es el caso adecuado para definir el  $\eta_{e,ref}$  de cara a la cogeneración.

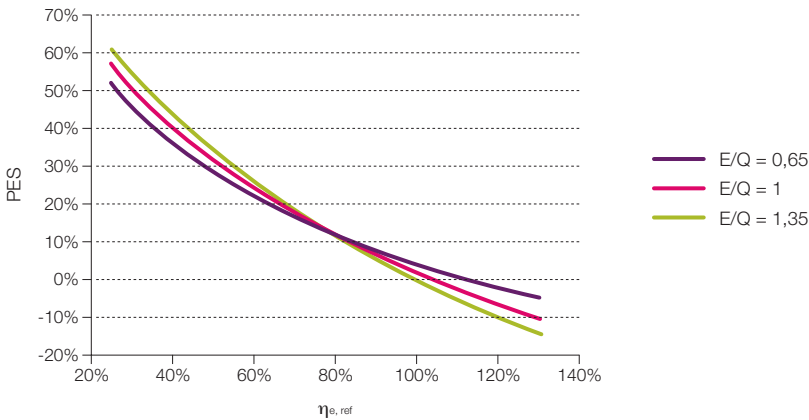
**109** Nótese que este rendimiento es inferior al que nos proporciona un ciclo combinado actual operando con gas natural, incluso sin participación de las renovables en el sistema eléctrico.

**110** Según el RD 142/2003, que regula el etiquetado energético de los acondicionadores de aire de tipo doméstico, la clase-A se alcanza para equipos *split* refrigerados por aire a partir de COP > 3,6, y para equipos compactos refrigerados por agua para COP > 4,7. En el caso de implementar refrigeradoras centralizadas a nivel de bloque o de distrito, refrigeradas por agua y alimentando un circuito de agua enfriada, el COP al que se podría optar sería COP > 7.

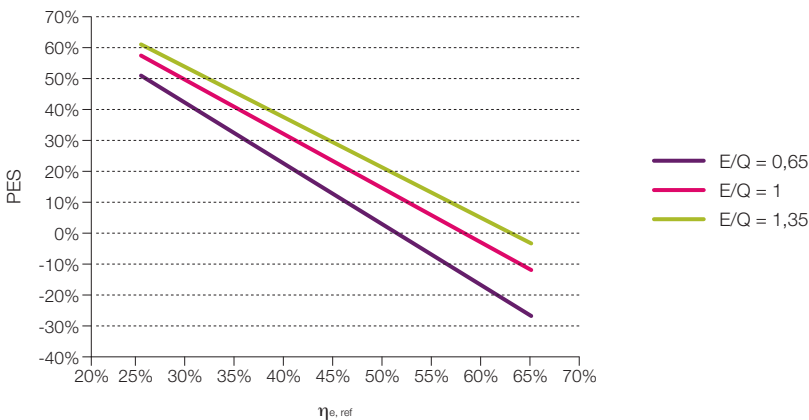
Para ilustrar más la evolución asociada a la mejora en el  $\eta_{e,ref}$ , en las figuras 32,33 y 34 mostramos cómo evoluciona el PES en función del  $\eta_{e,ref}$  para una cogeneración con el 90 % de rendimiento total y para cuatro casos de

procesos de comparación de generación térmica: caldera con rendimiento estacional del 80 %, bomba de calor con COP = 3,5 y bomba de calor con COP = 6,3, y para tres procesos distintos indicados por el ratio entre

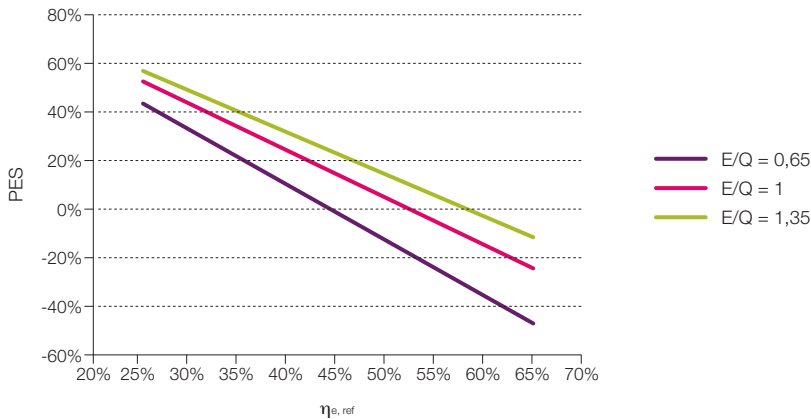
**Figura 32.** Efecto del  $\eta_{e,ref}$  sobre el ahorro de energía primaria para una cogeneración con el 90 % de rendimiento total cuando consideramos un proceso de referencia para la generación de calor con una caldera de  $\eta_{h,ref} = 80\%$ .



**Figura 33.** Efecto del  $\eta_{e,ref}$  sobre el ahorro de energía primaria para una cogeneración con el 90 % de rendimiento total cuando consideramos un proceso de referencia para la generación de calor con una bomba de calor de COP = 3,5.



**Figura 34.** Efecto del  $\eta_{e,ref}$  sobre el ahorro de energía primaria para una cogeneración con el 90% de rendimiento total cuando consideramos un proceso de referencia para la generación de calor con una bomba de calor de COP = 6,3.



las demandas eléctrica y térmica ( $E/Q$ ). Como podemos observar, para todos los casos el ahorro de energía primaria se va reduciendo al aumentar<sup>111</sup> el  $\eta_{e,ref}$ , hasta llegar a hacerse negativo para una valor del  $\eta_{e,ref}$  tanto más bajo cuanto más eficiente sea el proceso de referencia para generación de calor. Es de resaltar cómo incluso para el caso de emplear el efecto Joule para calefactar ( $COP = 1$ ), el PES se hace negativo para  $\eta_{e,ref} \geq 90\%$  (para este caso con una cogeneración de  $\eta_{tot} = 90\%$ ), y en un escenario de elevada penetración renovable en el sistema eléctrico, valores de  $\eta_{e,ref} = 90\%$  se alcanzan en muy pocos años como veremos a continuación.

### Escenarios evolución del $\eta_{e,ref}$ del sistema eléctrico

En estas condiciones resulta interesante explorar el ritmo de evolución del  $\eta_{e,ref}$  del sistema eléctrico peninsular, definido como cociente entre la electricidad producida y el combustible utilizado<sup>112</sup>, a medida que se van

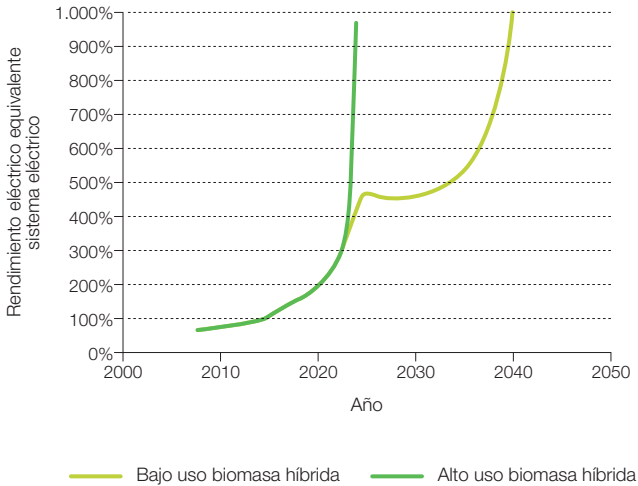
integrando energías renovables. Con este propósito hemos procesado los resultados presentados en los escenarios de introducción de renovables hasta el año 2050 desarrollados en (García-Casals, X., 2009).

La figura 35 nos muestra la evolución del rendimiento eléctrico equivalente del sistema eléctrico peninsular, definido como cociente entre la electricidad producida y el uso de combustible empleado, para los dos escenarios de sustitución de las centrales nucleares y de combustible fósil desarrollados en (García-Casals, X., 2009). Este rendimiento eléctrico equivalente es el resultante del sistema de generación eléctrica peninsular excluyendo la generación nuclear y la generación con biomasa. En ambos escenarios el fin del cierre de las centrales nucleares tiene lugar en el año 2016, y el uso de combustibles fósiles se prolonga hasta el año 2043 para el escenario con bajo uso de la biomasa híbrida, como consecuencia del pico de la demanda experimentado en torno al año 2030 y de la elección de no sobredimensionar el mix de

**111** Conviene recordar, una vez más, que a medida que se van integrando renovables en el sistema eléctrico, el  $\eta_{e,ref}$  tiende a infinito, pues la cantidad de combustible empleada para generar electricidad va tendiendo a cero. De acuerdo con los balances de la AIE para España, eliminando el efecto de la energía nuclear, nuestro sistema eléctrico en su conjunto ya tenía un  $\eta_{e,ref} = 51\%$ . Para la aplicación de la Directiva 2004/8/CE, en el caso de emplear gas natural, tenemos  $\eta_{e,ref} = 52,5\%$ .

**112** Como indicábamos anteriormente, el rendimiento del sistema eléctrico tiende al 100% al integrar renovables si para el denominador de dicho rendimiento consideramos la electricidad generada a partir de fuentes renovables (distinta a la biomasa). Sin embargo, desde el punto de vista de la comparación con la cogeneración, donde lo relevante es el uso que se hace del combustible empleado como entrada en el proceso de cogeneración (sea combustible fósil o biomasa), el denominador del rendimiento del sistema eléctrico parece más coherente definirlo como el combustible empleado en el sistema eléctrico. En estas condiciones, el rendimiento equivalente del sistema eléctrico tiende a infinito a medida que la generación eléctrica tiende a un 100% renovables con predominio de las otras fuentes renovables distintas a la biomasa. Evidentemente, estos valores superiores al 100% no se pueden interpretar como un rendimiento en su concepto convencional, pero sí como la eficacia en el uso de combustibles con la que el sistema eléctrico genera la electricidad, que tiende a infinito a medida que el sistema eléctrico se independiza del uso de combustibles. Es por este motivo que la comparativa con la cogeneración (proceso integrado de uso de los combustibles) se hace tan desfavorable para ésta, a medida que la generación eléctrica alternativa al proceso de cogeneración va a requerir una menor participación de los combustibles.

**Figura 35.** Evolución del rendimiento eléctrico equivalente del sistema eléctrico peninsular, definido como cociente entre la electricidad producida y el combustible utilizado, para los escenarios de evolución del sistema eléctrico desarrollados en (García-Casals, X., 2009).



generación renovable respecto a la demanda proyectada para el año 2050, o hasta el año 2025 en el caso de hacer un uso más extenso de la hibridación con biomasa para cubrir el pico de demanda en los años centrales del escenario. Como podemos ver, en ambos escenarios se supera el valor de  $\eta_{e,ref} = 100\%$  antes del año 2015, y prosigue el crecimiento de dicho parámetro, incluso con tasas superiores en los años siguientes. Los valores del  $\eta_{e,ref}$  a partir de los cuales veíamos más arriba que la cogeneración ya no tenía sentido al emplear bombas de calor para cubrir la demanda térmica (50-60%) ya se alcanzan desde el principio de los escenarios (momento actual), y el valor de  $\eta_{e,ref}$  a partir del cual incluso al emplear calefacción eléctrica por efecto Joule resulta más favorable que la cogeneración (90%) no queda muy lejano. Por tanto, en este contexto, difícilmente puede considerarse la cogeneración como

una tecnología relevante desde el punto de vista de la eficiencia.

### *Planteamientos y conclusiones respecto a la participación de la cogeneración en un contexto E3.0*

De acuerdo con los resultados presentados podemos concluir en primer lugar que bajo la perspectiva de un contexto E3.0 hay que abandonar la idea asociada a los contextos BAU de que la cogeneración constituye una tecnología de elevada eficiencia en general. A pesar de esto es posible que la cogeneración pueda jugar un papel relevante en la transición hacia el contexto E3.0 y dentro de ciertas aplicaciones, pero su idoneidad para una aplicación determinada debe ser analizada de forma crítica, y huir del tópico actual de que la cogeneración es buena per se. Por

tanto, de cualquier forma, cabe esperar que la participación de la cogeneración bajo este contexto sea significativamente inferior a la proyectada en los escenarios de eficiencia desarrollados en el pasado, e incluso su planteamiento de operación más eficiente puede verse modificado respecto al actual<sup>113</sup>.

Revisemos con algo más de detalle algunos de estos conceptos. Los puntos clave a tener en cuenta para analizar si la cogeneración constituye una tecnología apropiada para el sistema energético son los siguientes:

- En un contexto E3.0 donde la generación eléctrica está ampliamente dominada por el uso de tecnologías renovables en modo regulación, la opción más eficiente para producir calor es el uso de la electricidad residual<sup>114</sup> del sistema de generación eléctrica generable, con fuentes renovables no acumulables (no biomasa, no hidroeléctrica regulable). En efecto, el coste principal de esa electricidad corresponde a la inversión para instalar la potencia, y es un coste en el que ya se ha incurrido se use o no esa electricidad. Por tanto, podemos considerar esa electricidad como de coste prácticamente nulo, por lo que su uso para cubrir la demanda térmica es, sin duda alguna, la opción más eficiente desde el punto de vista técnico y económico. En el caso de aplicaciones térmicas de baja temperatura el uso más eficiente de esa electricidad con fines térmicos es mediante bombas de calor. Para el caso de aplicaciones de mayor temperatura, el efecto Joule directo según esa electricidad residual sigue siendo la mejor opción para cualquier valor del  $\eta_{e,ref}$ .
- Cuando la electricidad a emplear no es electricidad "residual" que se disiparía por requerimientos de regulación, la cogeneración basada en combustibles fósiles deja de

quedar justificada desde un punto de vista de eficiencia energética a partir del momento en el que el sistema eléctrico supere un cierto valor del  $\eta_{e,ref}$ , valor umbral que es tanto más bajo cuanto más eficiente sea la tecnología eléctrica empleada para cubrir la demanda térmica. Así, al emplear bombas de calor de alta eficiencia (COP  $\approx$  6,3), el valor límite del  $\eta_{e,ref}$  a partir del cual deja de estar justificada la cogeneración es de 45-50%, es decir, menor al actual del sistema eléctrico, por lo que ahora mismo ya no quedaría justificada la cogeneración. Si las bombas de calor que empleamos son menos eficientes (COP  $\approx$  3,5), el valor límite del  $\eta_{e,ref}$  a partir del cual deja de estar justificada la cogeneración es de 55-65%, es decir, del orden del actual del sistema eléctrico, por lo que en muy corto plazo, a medida que se siguen integrando renovables en la red eléctrica, dejaría de quedar justificada la cogeneración. E incluso para esas aplicaciones en que no se pueda recurrir a una bomba de calor<sup>115</sup> y la opción eléctrica para cubrir la demanda térmica sea el efecto Joule directo, la cogeneración deja de quedar justificada desde un punto de vista de eficiencia al superar valores del  $\eta_{e,ref}$  del orden del 90%, valor que quedaría superado en torno al año 2014 para los escenarios de introducción de renovables presentados en (García-Casals, X., 2009).

- En los puntos anteriores considerábamos electricidad generada con renovables no combustibles, es decir, renovables distintas a la biomasa. El uso de biocombustibles en cogeneración será siempre más eficiente que su uso en centrales termoeléctricas que no aprovechen el calor residual del ciclo de potencia<sup>116</sup>. Esto incluye el uso de combustibles derivados de la biomasa para hibridar centrales termosolares. Sin embargo, tal y como mostramos en (GP, 2007), la hibridación de

**113** Actualmente, una cogeneración, para ser eficiente debe ser operada siguiendo a la demanda térmica.

**114** Ver (GP, 2007) para una cuantificación de la gran cantidad de electricidad "residual" al operar un sistema de generación eléctrica basado en renovables.

**115** Por restricciones de espacio, cuando se trata de demanda térmica de baja temperatura, como en el sector edificación, o por condiciones térmicas al tratarse de demanda térmica de media o alta temperatura en el sector industrial.

**116** En principio, cualquier central termoeléctrica es susceptible de cogenerar, pero para ello es preciso que se encuentre emplazada cerca de una demanda de energía térmica que se acople bien con su capacidad de generación eléctrica.



centrales termosolares con biomasa constituye una herramienta de regulación fundamental y de bajo coste para poder operar un sistema 100% renovable con una demanda "ciega" a las necesidades y capacidades del sistema de generación, por lo que en este contexto el uso de la biomasa para generación eléctrica quedaría supeditado, en primer lugar a las necesidades de regulación, y en segundo lugar a las consideraciones de eficiencia<sup>117</sup>. Sin embargo, en un contexto E3.0 donde la demanda participa de forma activa en la regulación del sistema eléctrico y responde a las necesidades de éste, el papel fundamental que jugaba la hibridación termosolar con biomasa en (GP, 2007) pasa a ser mucho menos importante o incluso a desaparecer, por lo que las consideraciones de eficiencia energética en el uso del recurso biomasa priorizarían la aplicación de la biomasa en instalaciones de cogeneración. Sin embargo, incluso en estas condiciones, el uso de la biomasa para la operación del sistema eléctrico quedaría relegado a un segundo término<sup>118</sup> cuando pudiera justificarse desde un punto de vista técnico y económico.

Con estos puntos clave en mente, el planteamiento para la cobertura de demanda térmica (sectores edificación e industria) y para el uso de la biomasa en estos sectores<sup>119</sup> podría ser el siguiente:

1. Como primera opción para la cobertura de la demanda térmica usar la electricidad "residual" generada con renovables no acumulables (no biomasa ni hidroeléctrica regulada), vía bombas de calor para aplicaciones de baja temperatura y vía efecto Joule para aplicaciones de media / alta temperatura o para aquellas de baja temperatura que presenten restricciones para incorporar bombas de calor, junto con la aplicación de capacidad de acumulación térmica distribuida.

2. Como segunda opción emplear microcogeneración y cogeneración, en modo de operación de regulación de la generación eléctrica (potencia rodante sustitutoria de la hibridación termosolar). Sin embargo es preciso tener presente que éste es un modo de operación de la cogeneración distinto del actual (que sigue la demanda térmica), y su potencial de participación en el sistema energético depende y compite con la gestión de la demanda<sup>120</sup> para regulación eléctrica y con la cobertura de la demanda térmica anteriormente obtenida con electricidad residual. Por tanto, en este modo (factor de capacidad limitado) el coste del servicio de la cogeneración debe ser a priori bastante más elevado que el de la GDE/DSR. Por tanto, si bien en caso de que se den todas las condiciones (hueco demanda térmica en acumulación y requerimiento regulación eléctrica coincidentes) es más eficiente esta cogeneración que la hibridación termosolar (menores pérdidas, distribución eléctrica, aprovechamiento del calor residual, contribución a la regulación tensión red, integración en microred capaz operar en isla, etc.), es fácil que el CF (del inglés, Capacity Factor; Factor de Capacidad) resultante en las aplicaciones en el sector edificación<sup>121</sup> sea tan bajo que este método de regulación resulte mucho más caro que la hibridación termosolar (que comparte todo bloque de potencia con termosolar, y que tiene una escala muy superior que conduce a menores costes específicos). Por el contrario, en el sector industria, la existencia de demanda térmica de media temperatura, junto con la estructura menos gestionable de la misma, y el buen complemento<sup>122</sup> con el aprovechamiento de la electricidad "residual" desde el punto de

**117** Esto quiere decir que si el uso de la biomasa para hibridar una central termosolar proporciona mayor capacidad de regulación que su uso en una aplicación de cogeneración, el uso apropiado de la biomasa en estas condiciones sería para hibridar la central termosolar a pesar de presentar una menor eficiencia energética en el uso del recurso biomasa, pues la eficiencia del sistema energético total sería superior. Y dado que en un contexto de demanda "ciega" a las necesidades del sistema, todo el peso de la regulación recae sobre la capacidad de generación, el uso centralizado de la biomasa en las centrales termosolares sería la solución más apropiada.

**118** En efecto, dada la estructura del sistema energético en un contexto E3.0 por un lado, y las características de la biomasa por otro lado (capacidad de acumulación, requerimientos en otras aplicaciones energéticas no electrificables), el uso de la biomasa para generación de electricidad seguiría supeditado a las necesidades de regulación del sistema eléctrico, y en estas condiciones se limitan mucho más las posibilidades de las aplicaciones de cogeneración, pues se impone la importante restricción de que el calor residual pueda ser aprovechado (directamente o mediante acumulación) en los instantes en los que se requiere la operación de la planta de cogeneración desde el punto de vista de la regulación eléctrica. Es evidente que esto implica un cambio radical en el modo de operación de la cogeneración, desde el modo mandado por la demanda térmica (situación actual) hacia el modo mandado por la demanda eléctrica (o más específicamente los requerimientos de regulación del sistema eléctrico).

**119** La aplicación de la biomasa en el sector transporte es independiente de las consideraciones de eficiencia de la cogeneración y queda gobernada por otro tipo de consideraciones.

**120** DSM y DSR: DSM = Demand Side Management (gestión de la demanda); DSR = Demand Side Response (respuesta de la demanda). En la práctica ambos términos se usan a menudo para indicar el mismo concepto, pero el DSR hace más hincapié en el hecho de que la demanda responde a los requerimientos del sistema energético.

**121** Pues la elevada electrificación

vista de la integración del sistema energético, hacen que la cogeneración con biomasa se posicione como una tecnología apropiada que tan solo puede verse limitada por la disponibilidad del recurso biomasa<sup>123</sup>.

3. Como tercera opción para la cobertura de la demanda térmica, estaría el uso de la solar térmica distribuida. En efecto, por costes no puede competir con la opción 1, y a diferencia de la opción 2 no tiene capacidad de contribuir a la regulación del sistema eléctrico. Por otro lado, la solar térmica puede jugar un papel relevante en el proceso de transición de un contexto BAU a uno E3.0, por lo que una vez ya instalada podría cubrir el posible nicho de la opción 2, y limitar por tanto todavía más los posibles usos de la cogeneración<sup>124</sup>.

4. Finalmente, está la opción de usar la electricidad renovable no residual para cubrir la demanda térmica. Como hemos visto anteriormente, esta opción pasa a ser la más eficiente<sup>125</sup> a partir del momento en el que el sistema eléctrico supera un valor mínimo del  $\eta_{e,ref}$  que se encuentra entre un 45% y un 90%, según que se usen opciones eficientes de bomba de calor o elementos resistentes directos (efecto Joule) para cubrir la demanda térmica con electricidad. Dado que estos valores del  $\eta_{e,ref}$  o bien ya se han superado o lo harán en breves años, por eficiencia esta opción entraría antes que la opción 2 (cogeneración). Adicionalmente, los bajos CF con los que podrían operar las opciones 2 y 3 en un contexto E3.0, junto con las economías de escala y elevados CF de las tecnologías de generación eléctrica basándose en renovables en este contexto, traen como consecuencia que desde un punto de vista de costes esta opción 4 desplace a las opciones 2 y 3.

Según todas estas consideraciones, y teniendo en cuenta que además la biomasa puede jugar un papel muy relevante en cubrir ciertas aplicaciones del sector transporte, hemos decidido no considerar la cogeneración (ni basado en combustible fósil ni en biomasa) como una de las tecnologías participantes en el contexto E3.0 a largo plazo para la cobertura de la demanda térmica del sector edificación. Por el contrario, en el sector industrial sí que consideramos como una tecnología apropiada para el contexto E3.0 la cogeneración basada en biomasa y operada preferentemente desde el punto de vista de los requerimientos de regulación del sistema eléctrico, complementada por el aprovechamiento de la electricidad residual del sistema eléctrico para proporcionar la requerida garantía de cobertura de la demanda, y sometida a la limitación de no disparar el consumo de biomasa más allá de valores que parezcan razonables en términos relativos con el escaso recurso disponible.

### 2.6.3.3 Solar térmica de baja temperatura

El uso de la energía solar térmica para cubrir la demanda térmica, ha sido habitualmente considerado como una de las tecnologías renovables prioritarias para potenciar su introducción. En efecto, la tecnología es aparentemente<sup>126</sup> sencilla, y sus rendimientos elevados en comparación con otras tecnologías renovables<sup>127</sup>, por lo que el potencial de hacerse cargo de una gran fracción de la demanda térmica de baja y media temperatura a costes limitados es para la tecnología solar térmica muy importante.

Tanto es así, que en el campo de la edificación la regulación actual<sup>128</sup>, desde el año 2006 obliga a incluir en los edificios una instalación

hacia la que tiende este sector en un contexto E3.0 deja muy poco hueco a la participación de la cogeneración.

**122** En efecto, una aplicación de cogeneración basándose en biomasa complementada con el aprovechamiento de electricidad residual, representa una combinación muy adecuada desde el punto de vista de la integración del sistema energético. La cogeneración, comandada por los requerimientos de regulación del sistema eléctrico, opera a modo de regulación hacia arriba, mientras que el aprovechamiento de la electricidad "residual" del sistema eléctrico opera como regulación hacia abajo, complementándose muy bien ambos elementos para proporcionar la garantía requerida para la cobertura de la demanda del sector industrial con limitada capacidad de GDE.

**123** Tal y como veremos más adelante en el desarrollo del escenario para el sector industria, si bien la cogeneración con biomasa participa en el mix tecnológico elegido para configurar el contexto E3.0, su participación que viene gobernada por la demanda térmica, queda limitada por la necesidad de acotar el uso que se haga de la biomasa dada la escasez de este recurso, y dada una demanda térmica, la cantidad de biomasa necesaria para satisfacerla es mucho más elevada al emplear una cogeneración que al emplear una combustión directa.

**124** De hecho, en el sector industria, que es donde más uso se hace de la solar térmica distribuida en el contexto E3.0, el aporte solar permite reducir los requerimientos de biomasa dada la escasez de este recurso.

**125** En comparación a la cogeneración con combustibles fósiles.

**126** Las apariencias engañan, y esta no es una excepción. A pesar de que el colector solar térmico obedece a principios físicos bastante sencillos, producir colectores solares térmicos con buenas prestaciones mantenidas a lo largo del tiempo no es tan sencillo, y más de un caso de desacreditación de la tecnología nos hemos encontrado por este camino. Adicionalmente, a pesar de la "sencillez" del colector solar, desde el punto de vista del conjunto de sistema, una instalación solar térmica es considerablemente más

solar térmica para cubrir una fracción entre<sup>129</sup> el 30% y el 70% de la demanda de ACS<sup>130</sup>.

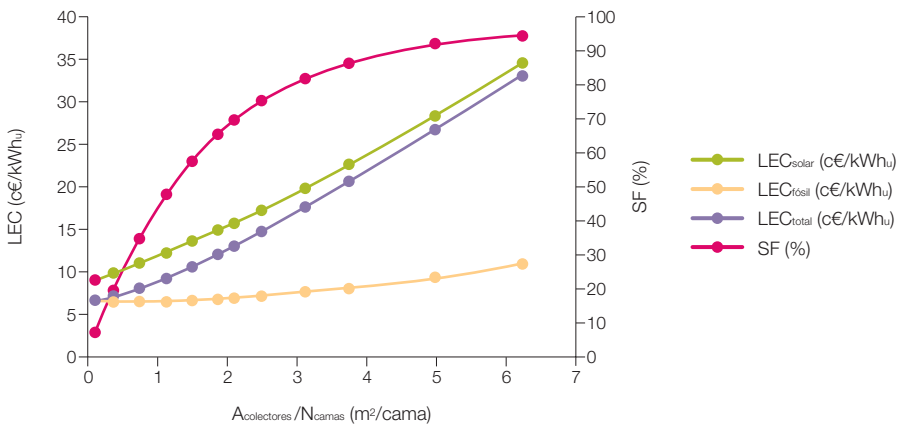
En la figura 36 mostramos las prestaciones energéticas y económicas de una instalación solar térmica para cubrir la demanda de ACS en un hotel emplazado en A Coruña<sup>131</sup>, en función del área de colectores implementada.

El primer elemento de las prestaciones de este sistema sobre el que queremos llamar la atención es la fracción solar (SF), es decir, la cobertura de la demanda total de ACS que se alcanza mediante el aporte solar. Como podemos observar en esta figura, la SF permanece siempre por debajo del 100%, es decir, el aporte solar requiere un apoyo energético para completar la demanda<sup>132</sup>, que en el caso del ejemplo mostrado en esta figura es una caldera de gas natural. Conceptualmente la forma de operar de este sistema energético es dando siempre prioridad<sup>133</sup> al

aporte solar (es el primero que entra para cubrir la demanda), y completando las necesidades energéticas con el aporte de energía auxiliar (gas natural en este caso). Evidentemente la gestión de la demanda puede contribuir a aumentar la SF para un tamaño dado del campo solar, sin embargo, el carácter distribuido y aislado de esta tecnología hace que el alcance de la GDE sea muy inferior al que podemos obtener a nivel del sistema energético peninsular. La SF puede aumentarse a costa de aumentar el tamaño del campo solar instalado, y tiende asintóticamente al 100% incluso para una demanda no gestionable, pero a costa de disparar<sup>134</sup> el coste de la energía de origen solar.

En efecto, esta figura nos muestra también la evolución del coste normalizado (LEC) de la energía útil de esta instalación. El  $LEC_{solar}$  muestra el coste de la energía útil de origen solar, el  $LEC_{fósil}$  el de la energía de origen

**Figura 36.** Prestaciones de un sistema solar térmico para ACS en un hotel de A Coruña. Colectores planos ( $\eta_{opt} = 81\%$ ,  $U_L = 3,71 \text{ W/m}^2\text{K}$ ), demanda de ACS de 70 l/cama-día @ 60 °C, coste de inversión del sistema solar de 615 €/m<sup>2</sup>, coste del gas natural de 4,4 €/kWh<sub>PCS</sub> y rendimiento estacional de la caldera de 91.5%.



complicada que por ejemplo una instalación solar fotovoltaica, y las posibilidades de que el sistema no opere de forma adecuada a lo largo de toda su vida útil son mucho más elevadas que en el caso de otras tecnologías de energías renovables. El carácter eminentemente distribuido de esta tecnología no ayuda a aliviar esta situación.

**127** En condiciones nominales, el rendimiento de un colector solar plano es del orden del 70%, frente al 15% de un módulo fotovoltaico, por lo que la potencia instalada por unidad de superficie es más de 4,5 veces superior con los colectores térmicos que para los módulos fotovoltaicos.

**128** El Código Técnico de la Edificación (CTE), que entró en vigor el 29/3/2006.

**129** Según la zona climática y tamaño de la instalación.

**130** A pesar de esta obligación regulatoria y de la escasa diferencia entre el coste de la energía solar térmica y la alternativa de usar por ejemplo una caldera de gas, la realidad es que el despliegue alcanzado por esta tecnología en nuestro país hasta la fecha ha sido muy inferior a sus posibilidades, y se ha quedado incluso considerablemente por debajo de los objetivos de planificación nacional (PER). Diversos son los factores que han influido en esta situación, pero entre ellos podemos destacar la menor eficiencia de los mecanismos de apoyo implementados para esta tecnología, que bien sea vía subvención o vía obligación regulatoria, no han vinculado el apoyo a sus prestaciones energéticas reales, por lo que ahora se está proponiendo un mecanismo de apoyo, tipo prima a la producción, como los implementados en las tecnologías renovables de generación eléctrica dentro del régimen especial.

**131** A Coruña no es el mejor emplazamiento solar de España, pero tampoco el peor. El valor de la radiación solar anual en horizontal para A Coruña es un 85% de la media de las capitales de provincia, y un 122% de la irradiación solar en la peor capital de provincia. De todas formas, añadiremos comentarios sobre los resultados en un mejor emplazamiento solar.

**132** Se trata por tanto de instalaciones híbridas.

**133** Este elemento es relevante las limitaciones que surgen en el contexto E3.0 para esta tecnología.

**134** Esto es una consecuencia directa de la reducción del factor de capacidad con el que

fósil, y el  $LEC_{total}$  el del conjunto de la instalación híbrida. Como podemos ver, para pequeñas superficies de colectores instalados, el coste de la energía solar es tan solo unos 3 c€/kWh superior al de la caldera de gas natural, sin embargo, en estas condiciones la SF proporcionada por la instalación es muy baja.

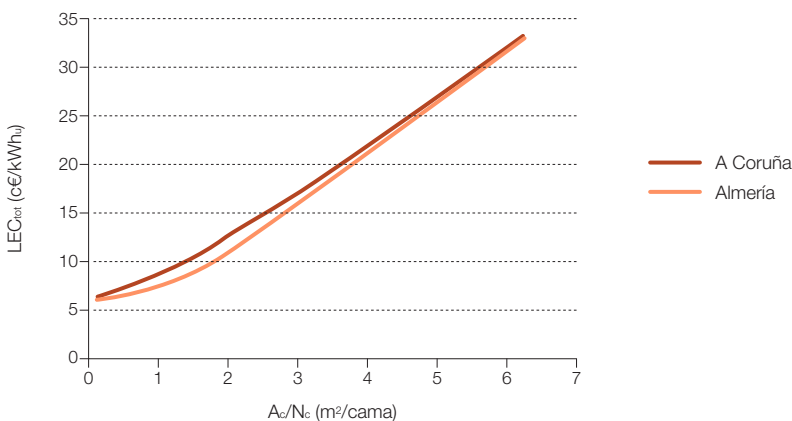
A medida que aumentamos la superficie del campo solar se incrementa<sup>135</sup> de forma muy importante el coste de la energía de origen solar, debido a que el campo solar instalado se emplea con menor CF. El coste de la energía útil obtenido con la caldera también se va incrementando, pues el mayor aporte solar permite producir una menor cantidad de energía de origen fósil, pero dado el nivel considerablemente inferior de inversión de la caldera respecto al campo solar, el ritmo de crecimiento del coste de la energía útil de origen fósil es muy inferior al de la solar, de tal forma que ambos costes se van distanciando<sup>136</sup>. Para una fracción solar del 57%, del orden<sup>137</sup> de la máxima que exige el Código Técnico de

la Edificación (CTE) para esta región, el coste normalizado de la energía útil de origen solar ya alcanza los 13,6 c€/kWh, del orden de 7 c€/kWh superior al de la energía fósil, y para una fracción solar del 82% el coste del aporte solar se acerca a los 20 c€/kWh, del orden de 12 c€/kWh por encima del aporte fósil.

Otro punto a observar es que el coste total de la energía térmica producida alcanza su valor mínimo cuando no hay instalación solar, es decir, que con las estructuras de costes actuales el aporte solar representa un incremento en el coste de la energía térmica producida. Evidentemente, a medida que aumenta el coste del recurso fósil, esta situación va mejorando, pero para que aparezca un mínimo interior en la curva de costes totales<sup>138</sup> sería preciso que el coste del gas natural aumentara mucho y sobre todo, que el coste del sistema solar se redujera mucho.

Para ver el efecto del emplazamiento solar, en la figura 37 reproducimos los costes totales de la energía térmica útil producida para

**Figura 37.** Comparativa de los costes totales de la energía útil generada de una instalación solar con apoyo de gas natural para la cobertura de la demanda de ACS en un hotel, como función del tamaño del campo solar.



se usa la instalación solar a medida que la sobredimensionamos respecto a la demanda que debe de cubrir: una vez más un problema directamente asociado al carácter distribuido y autónomo de estos sistemas, en los que a medida que se incrementa el tamaño relativo de la capacidad instalada respecto a la demanda (múltiplo solar), crece el requerimiento de disipación de energía que no es posible aprovechar localmente. En el caso de los campos solares esta disipación tiene lugar cuando los colectores alcanzan su temperatura de estancamiento, en la cual su rendimiento se anula. Adicionalmente a la capacidad de generar energía útil (reducción del CF), estas elevadas temperaturas deterioran la instalación solar.

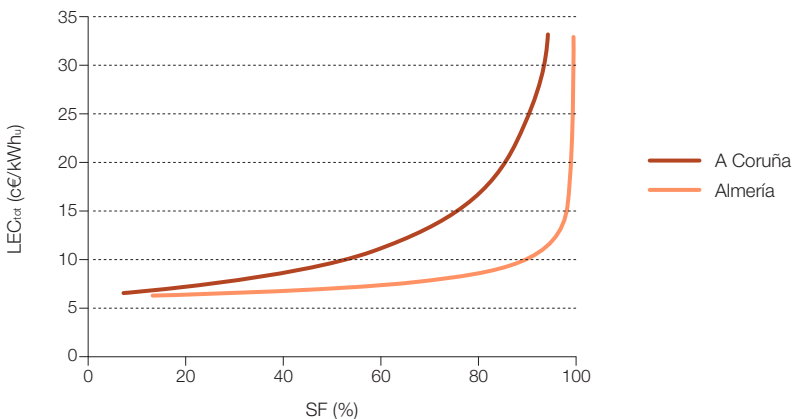
- 135** Con tasas de crecimiento crecientes.
- 136** En el caso de considerar un mejor emplazamiento solar, como Almería (recurso solar del 116% de la media de las capitales de provincia), la SF crece mucho más rápido, por lo que a partir de una superficie del campo solar ligeramente superior a los 2 m²/cama el coste de la energía fósil supera al de la solar y se dispara como consecuencia del pequeño aporte fósil necesario (bajo factor de capacidad de la caldera) debido a la elevada fracción solar obtenida. Sin embargo, el coste total de la energía producida es del mismo orden de magnitud que en A Coruña dado el dominio de la inversión solar.
- 137** El máximo actual exigido en esta zona climática es del 52% para instalaciones con demanda de ACS de más de 20.000 l/d.
- 138** Es decir, para que existiera un tamaño óptimo del campo de colectores para el cual se minimizara el coste total de la energía térmica producida.

la aplicación considerada en los emplazamientos de A Coruña y Almería como función del tamaño del campo solar. Como podemos observar las diferencias a nivel de coste total entre ambos emplazamientos no son excesivas, debido a que si bien en el mejor emplazamiento solar las fracciones solares se incrementan significativamente, pero el factor de capacidad de la instalación solar aislada se reduce, y a igualdad de campo solar el único ahorro debido al mejor emplazamiento es el de combustible, con una contribución relativamente baja sobre el coste total. Sin embargo, tal y como muestra la figura 38 a igualdad de cobertura solar las diferencias de costes de la energía generada sí que son mucho más importantes, debido a que el mejor emplazamiento permite reducir la inversión en campo solar, que es el componente que domina la estructura de costes. Sin embargo, en cualquiera de los casos, al perseguir contribuciones elevadas, los costes asociados a la generación de la energía útil rápidamente suben por encima

de los correspondientes a producir esa energía térmica vía eléctrica mediante bombas de calor eficientes<sup>139</sup>.

De la tecnología solar térmica no podemos esperar una cobertura total de la demanda, sino tan solo una reducción de la parte de la misma a cubrir con otra fuente energética, y debido a que el subsistema solar domina fuertemente en la estructura de costes de estos sistemas, el aporte solar pasa a ser la fuente energética que tiene la máxima prioridad en estos sistemas, lo cual añade un importante grado de inflexibilidad desde el punto de vista de la integración del sistema energético. A pesar de esto, veremos cómo en algunos sectores como el industrial, una vez agotadas las opciones de las bombas de calor trabajando de forma eficiente e integrada la electricidad “residual” procedente de la regulación del sistema, la energía solar térmica nos permite acotar el uso de biomasa a cantidades compatibles con el recurso disponible.

**Figura 38.** Comparativa de los costes totales de la energía útil generada de una instalación solar con apoyo de gas natural para la cobertura de la demanda de ACS en un hotel, como función de la fracción solar alcanzada.



**139** En efecto, en este caso debemos tener presente que el coste de producción de la energía térmica útil sería del orden del coste de producción de la electricidad dividido por el COP de la bomba de calor.

Mención especial merece la integración de energía solar térmica en redes de distrito. Cuando existe una red de distrito de gran capacidad en comparación con la capacidad de la instalación solar que conectamos a la red, gran parte de las rigideces que acompañan a la solar térmica se relajan o desaparecen, así como sus penalizaciones por costes elevados al perseguir una cobertura importante de la demanda. En efecto, la situación pasa a ser análoga a la de interconexión de las instalaciones fotovoltaicas con la red eléctrica en contraposición a las aplicaciones fotovoltaicas aisladas: para una cobertura completa de la demanda en balance anual, el factor de capacidad con el que se usa la instalación interconectada a la red es mucho más elevado, y reduce sus costes por unidad de energía. Sin embargo, en un contexto E3.0 esta opción solo queda abierta para aquellos emplazamientos que en el pasado desplegaron<sup>140</sup> la red de distribución de energía térmica, pero difícilmente justifica la construcción de esta red de distrito dentro del propio contexto E3.0. En efecto, en un contexto E3.0 donde la demanda térmica del sector edificación se reduce muchísimo hasta prácticamente desaparecer, y en el que la demanda térmica residual se puede cubrir de forma muy eficiente con energía eléctrica, difícilmente se justifica la duplicación<sup>141</sup> de infraestructuras asociadas a la creación de una red de distrito, que además cuenta con unas pérdidas por distribución mucho más elevadas a las correspondientes a la distribución de energía eléctrica. Por estos motivos, el despliegue de redes de distrito no parece la opción más adecuada para construir el sistema energético bajo un contexto de eficiencia actual. Sin embargo, allí donde esa infraestructura energética adicional ya se encuentre desplegada, la evolución eficiente en el contexto actual pasa por desplazar la generación procedente de cogeneración centralizada, y la integración

de solar térmica distribuida interconectada a esta red puede proporcionar una herramienta muy adecuada y eficiente para avanzar en esa dirección.

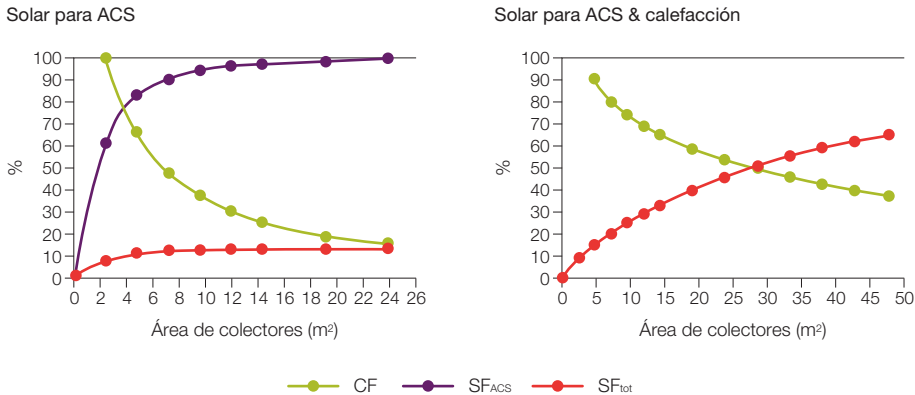
Una opción para obtener un sistema 100% renovable basado en la utilización de energía solar térmica distribuida consiste en hibridar el campo solar con una caldera de biomasa. Esta combinación, tanto para el caso de dedicar el aporte solar a la cobertura de la demanda de ACS, como cuando el aporte solar se extiende para cubrir además de la demanda de ACS la de calefacción (combisystem) fue analizada en (García-Casals, X., 2005) para el caso de una vivienda unifamiliar en la Comunidad de Madrid<sup>142</sup>, que nos puede servir de ejemplo para comentar los principales aspectos conceptuales asociados a esta opción tecnológica. En la figura 39 presentamos las prestaciones energéticas de este sistema, tanto para el caso de dedicar el aporte solar tan solo al ACS como para el caso de dedicarlo al ACS y a la calefacción.

En el caso de emplear la instalación solar tan solo para la cobertura de la demanda de ACS, podemos observar cómo la fracción solar en la cobertura de la demanda de ACS crece rápidamente al aumentar el tamaño del campo solar. Para un área de 2 m<sup>2</sup> ya alcanzamos la fracción solar del 60% que exige el CTE para esta instalación<sup>143</sup>. Para estas bajas superficies del campo solar, la instalación solar se emplea de forma muy efectiva (CF muy elevado), por lo que los costes de la energía solar producida son bajos. Si seguimos aumentando el tamaño del campo solar, crece la fracción solar, de tal forma que para 10 m<sup>2</sup> de colector prácticamente cubrimos ya el 90% de la demanda de ACS con el aporte solar, pero a costa de una gran reducción del CF que tendrá consecuencias muy importantes sobre el coste de la energía térmica útil

**140** En países como Dinamarca, en el pasado se hizo una fuerte apuesta por las redes de distrito como estrategia para aprovechar el calor residual de sus centrales térmicas. Esta estrategia, desde el punto de vista de la eficiencia energética, resultaba muy apropiada en el sistema energético del pasado, gobernado desde el lado de la oferta, y basado en la generación de electricidad mediante combustibles fósiles en grandes centrales termoeléctricas. Sin embargo, para los sistemas energéticos en un contexto E3.0, o incluso en un contexto BAU con una creciente participación de renovables en el sistema de generación eléctrica, esta estrategia no resulta adecuada por las rigideces que introduce, y dificulta la penetración de energías renovables en el sistema, duplicando las infraestructuras energéticas, e incurrindo en un incremento de pérdidas por distribución. De hecho, resulta curioso analizar el desempeño del sistema energético en países como Dinamarca que en el pasado realizaron una gran apuesta en esta dirección: nos encontramos con un sistema eléctrico altamente carbonizado y rígido para la incorporación de energías renovables (a pesar de las buenas conexiones internacionales), y un sistema térmico disfrazado de unas muy buenas prestaciones ambientales mediante la no internalización de su responsabilidad en la operación de las centrales fósiles. Es la óptica del pasado, en la que el calor producido por las centrales térmicas se consideraba un residuo y por tanto su carbonización no repercutía en la generación térmica. Pero en la óptica actual, ese calor ya no es un residuo, en tanto en cuanto que existen otras alternativas para generar la electricidad sin depender de la combustión de recursos fósiles, y por tanto el calor debe compartir la responsabilidad en cuanto a emisiones de carbono con la electricidad generada a partir de la combustión de esos recursos fósiles, y en estas condiciones, las prestaciones ambientales del sistema de generación térmica ya distan mucho de la idealidad que aparentaban.

**141** Duplicación porque la red eléctrica con capacidad de distribuir los mismos servicios térmicos ya tiene que ser desplegada para cubrir el grueso de la demanda energética distribuida, que es en forma de energía eléctrica. Por tanto, lo más coherente

**Figura 39.** Fracción solar y factor de capacidad de una instalación solar térmica hibridada con biomasa destinada a cubrir la demanda de ACS y calefacción o solo la de ACS en una vivienda en la Comunidad de Madrid. Demanda ACS de 150 l/día @ 60 °C y de calefacción de 65 kWh/m<sup>2</sup>-a para 300 m<sup>2</sup>, colectores planos ( $\eta_{opt} = 81,8\%$ ;  $k_1 = 3,47$  W/m<sup>2</sup>K;  $k_2 = 0,0101$  W/m<sup>2</sup>K<sup>2</sup>) (García-Casals, X., 2005).



de origen solar. Y a pesar de ello, la fracción solar total (SF<sub>tot</sub>), esto es, la asociada a la cobertura de la demanda térmica total (ACS y calefacción), sería tan solo del 13% para superficies del campo solar por encima de 10 m<sup>2</sup>. En estas condiciones estamos desperdiciando la mayoría de la capacidad de generación de la instalación solar, por lo que resulta interesante permitir que aporte también a la cobertura de demanda térmica para calefacción.

En la misma figura podemos observar las prestaciones energéticas del combisystem. En estas condiciones, la fracción solar no se estanca a partir de 10 m<sup>2</sup> de superficie de colectores, y puede llegar a alcanzar valores considerablemente más elevados. El CF para un determinado valor de la superficie de colectores también es en este caso considerablemente superior, e indica un mejor aprovechamiento de la instalación solar. Sin embargo, para 10 m<sup>2</sup> la fracción solar para la cobertura de la demanda térmica total es del orden del 25%, y es preciso llegar a superfi-

cias del orden de 30 m<sup>2</sup> para que el aporte solar cubra la mitad de la demanda térmica: es decir, para la mayoría de los casos con sentido técnico-económico, la principal fuente energética para la cobertura de la demanda es la biomasa.

Por lo que respecta a la estructura de los costes del sistema híbrido solar-biomasa, en la figura 40 presentamos la dependencia con la superficie del campo solar de los costes normalizados del aporte solar, el aporte de biomasa y el total del sistema.

Como podemos observar, el coste de la energía útil de origen solar presenta en este caso un valor mínimo, para el caso de que el aporte solar se destine tan solo a la producción de ACS se sitúa en torno a los 6 m<sup>2</sup>, y en el caso del combisystem el mínimo es más acentuado y se encuentra entorno a los 10 m<sup>2</sup>. Para el caso de usar el aporte solar tan solo para ACS, el coste del aporte térmico útil procedente de la biomasa se mantiene prácticamente constante independientemente de la

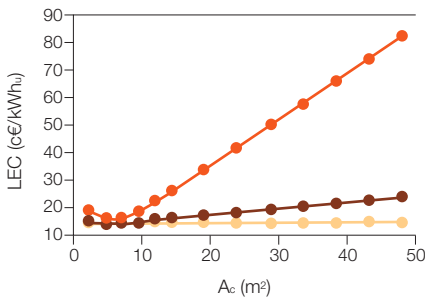
parece emplear esa misma estructura de distribución para cubrir el pequeño remanente de demanda térmica que escapa al alcance de las medidas de eficiencia.

- 142** Recurso solar en términos de irradiación total anual sobre horizontal del orden de la media de las capitales de provincia peninsulares.
- 143** Nótese que, al tratarse de una instalación híbrida solar térmica-biomasa-, la fracción renovable sería del 100% independientemente del tamaño del campo solar, por lo que desde el punto de vista del CTE no habría obligación alguna de instalar colectores solares. En el caso de que el apoyo del campo solar fuera energía fósil, el CTE requeriría una fracción solar mínima del 60%.

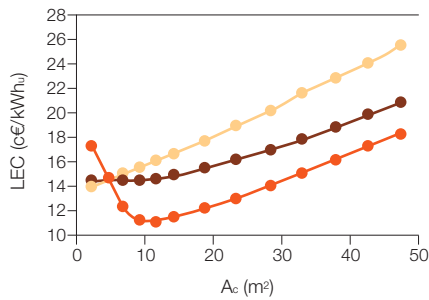
**Figura 40.** Coste normalizado de la energía producida con una instalación solar térmica hibridada con biomasa destinada a cubrir la demanda de ACS y calefacción o solo la de ACS en una vivienda en la Comunidad de Madrid. Demanda ACS de 150 l/día @ 60 °C y de calefacción de 65 kWh/m<sup>2</sup>-a para 300 m<sup>2</sup>, colectores planos ( $\eta_{opt} = 81,8\%$ ;  $k_1 = 3,47$  W/m<sup>2</sup>K ;  $k_2 = 0,0101$  W/m<sup>2</sup>K<sup>2</sup>, precio de la biomasa de 2,91 c€/kWh para las astillas de madera y de 2,62 c€/kWh para los pellets, caldera de biomasa con 89,5% de rendimiento estacional, coste de inversión de 470 €/kW @ 25 kW, y coste de inversión del sistema solar decreciente con el tamaño del campo tendiendo asintóticamente a 420 €/m<sup>2</sup> para el caso de instalaciones solares para ACS y de 450 €/m<sup>2</sup> para instalaciones solares de ACS y calefacción (García-Casals, X., 2005).

#### Stillas madera. Biomasa silo arial. Caldera

##### Solar para ACS

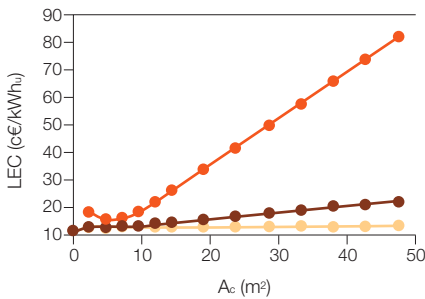


##### Solar para calefacción + ACS

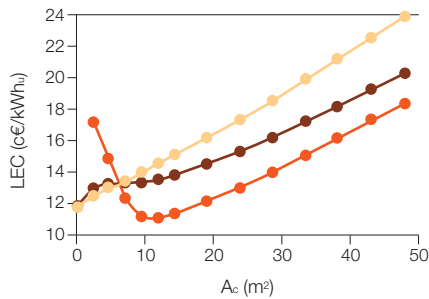


#### Pellets. Biomasa silo arial. Caldera

##### Solar para ACS



##### Solar para calefacción + ACS



— Biomasa — Total — Solar

superficie de colectores solares, debido a que en este caso es la biomasa la que se hace cargo del grueso de la demanda térmica. Pero para el caso de que el aporte solar se emplee para el ACS y la calefacción, el coste de la energía útil de origen de la biomasa crece rá-

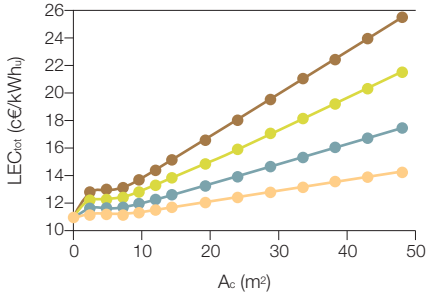
pidamente con la superficie de colectores. A diferencia del caso anterior del hotel en A Coruña en el que la hibridación se realizaba con una tecnología de muy bajo coste de inversión (caldera de gas natural), en el caso del híbrido solar-biomasa, el coste de inversión de



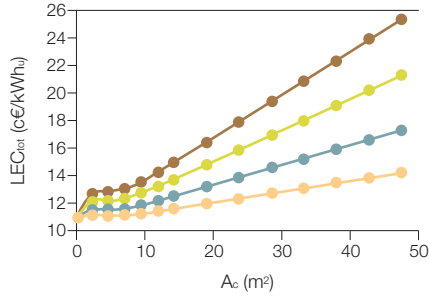
**Figura 41.** Efecto del coste de inversión asintótico del sistema solar sobre el coste normalizado de la energía producida con una instalación solar térmica hibridada con biomasa en la que la instalación solar se emplea tan solo para el ACS, para una vivienda en la Comunidad de Madrid. Demanda ACS de 150 l/día @ 60 °C y de calefacción de 65 kWh/m<sup>2</sup>-a para 300 m<sup>2</sup>, colectores planos ( $\eta_{opt} = 81,8\%$ ;  $k_1 = 3,47$  W/m<sup>2</sup>K ;  $k_2 = 0,0101$  W/m<sup>2</sup>K<sup>2</sup>, precio de la biomasa de 2,91 c€/kWh para las astillas de madera, 2,62 c€/kWh para los pellets, y 2,24 c€/kWh para el hueso de aceituna, caldera de biomasa con 89.5% de rendimiento estacional, coste de inversión de la caldera de biomasa de 470 €/kW @ 25 kW (García-Casals, X., 2005).

### Efecto inversión solar . Energía solar para Caldera

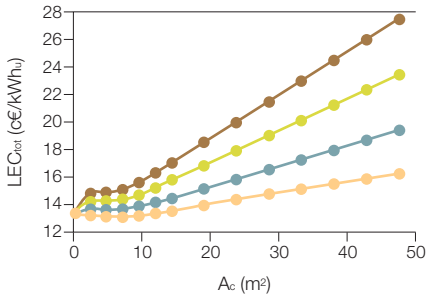
Hueso aceituna. Tamaño silo fijo



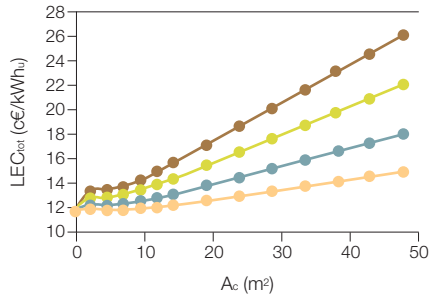
Hueso aceituna. Tamaño silo variable



Astillas madera. Tamaño silo variable



Pellets. Tamaño silo variable



—●—  $C''_{inv} = 600$  €/m<sup>2</sup>    —●—  $C''_{inv} = 400$  €/m<sup>2</sup>    —●—  $C''_{inv} = 200$  €/m<sup>2</sup>    —●—  $C''_{inv} = 50$  €/m<sup>2</sup>

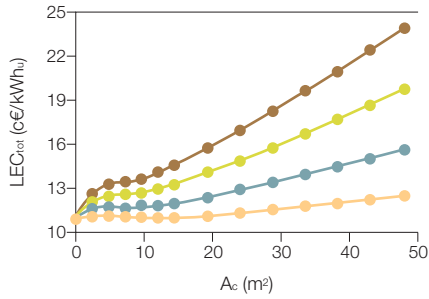
la caldera es muy superior (unas siete veces superior), por lo que la reducción del CF de la caldera a medida que aumentamos el aporte solar repercute muy significativamente sobre el coste de la energía útil de origen de la biomasa. Estas dos tendencias contrapuestas de los costes de la energía térmica de origen solar y de origen de la biomasa son las que producen

la tendencia a que aparezca un mínimo local en la curva de coste total de la energía térmica producida por el sistema híbrido. Este mínimo local tiende a acentuarse a medida que se reduce el coste de inversión de la instalación solar, o a medida que aumenta el coste del combustible de biomasa. Para la estructura de costes actual, el mínimo local está asociado a

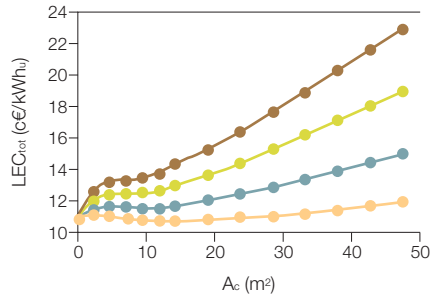
**Figura 42.** Efecto del coste de inversión asintótico del sistema solar sobre el coste normalizado de la energía producida con una instalación solar térmica hibridada con biomasa en la que la instalación solar se emplea para el ACS y la calefacción (combisystem) para una vivienda en la Comunidad de Madrid. Demanda ACS de 150 l/día @ 60 °C y de calefacción de 65 kWh/m<sup>2</sup>-a para 300 m<sup>2</sup>, colectores planos ( $\eta_{opt} = 81,8\%$ ;  $k_1 = 3,47 \text{ W/m}^2\text{K}$ ;  $k_2 = 0,0101 \text{ W/m}^2\text{K}^2$ ), precio de la biomasa de 2,91 c€/kWh para las astillas de madera y de 2,62 c€/kWh para los pellets, caldera de biomasa con 89,5% de rendimiento estacional, coste de inversión de la caldera de biomasa de 470 €/kW @ 25 kW (García-Casals, X., 2005).

### Efecto inversión solar . Energía solar para calefacción ACS Caldera

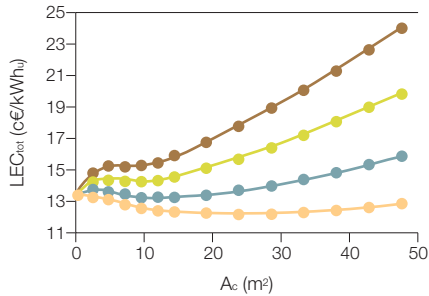
Hueso aceituna. Tamaño silo fijo



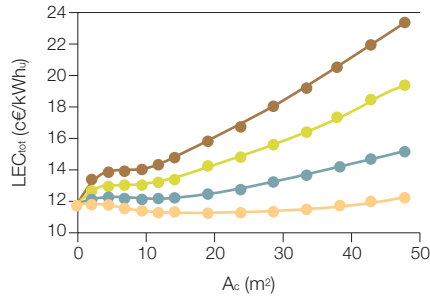
Hueso aceituna. Tamaño silo variable



Astillas madera. Tamaño silo variable



Pellets. Tamaño silo variable



—●—  $C''_{inv} = 600 \text{ €/m}^2$  —●—  $C''_{inv} = 400 \text{ €/m}^2$  —●—  $C''_{inv} = 200 \text{ €/m}^2$  —●—  $C''_{inv} = 50 \text{ €/m}^2$

un coste superior al correspondiente a emplear tan solo la biomasa para cubrir el total de la demanda térmica, por lo que desde un punto de vista económico el óptimo sería el asociado a suprimir la instalación solar. Sin embargo, habida cuenta de que el valor del coste para este mínimo total es para los combisystem bastante

parecido al coste sin instalación solar, y dado lo escaso del recurso biomasa en nuestro país, el sistema híbrido solar-biomasa puede resultar más apropiado desde una perspectiva de sostenibilidad, si bien, tal y como hemos visto anteriormente, para estos 10 m<sup>2</sup> de colector la fracción solar es tan solo de un 25%.

En este contexto cabe plantearse hasta dónde tendría que reducirse el coste de inversión en el sistema solar para que el sistema óptimo, desde el punto de vista económico, implicara la instalación de un campo solar con una fracción solar lo más elevada posible. Las figuras 41 y 42 nos presentan estos resultados para los casos de emplear el aporte solar solo para la cobertura del ACS o de usarlo tanto para el ACS como para la calefacción.

En el caso de emplear el aporte solar tan solo para el ACS, vemos cómo es preciso reducir el coste asintótico<sup>144</sup> de inversión de la instalación solar hasta 50 €/m<sup>2</sup>, es decir, del orden de ocho veces inferior al coste actual para que se produzca esta situación, e incluso en este caso, debido a la limitación en disponibilidad de demanda a cubrir (solo ACS), la superficie de colectores a instalar es del orden de tan solo 6 m<sup>2</sup>, que si bien proporciona una cobertura de la demanda de ACS del orden del 90%, en términos de la demanda térmica total la cobertura solar es tan solo del orden del 12%.

Para el caso del combisystem, según el combustible de biomasa empleado, vemos cómo entre 200 €/m<sup>2</sup> y 50 €/m<sup>2</sup> de inversión asintótica del sistema solar puede hacer aparecer este óptimo solar, que en algunos casos, para 50 €/m<sup>2</sup> se puede encontrar en torno a los 25-30 m<sup>2</sup> de superficie de campo solar, lo cual nos permitiría cubrir del orden del 50% de la demanda térmica total con energía solar. Sin embargo, una reducción de costes de inversión solar térmica hasta los 50 €/m<sup>2</sup> parece bastante difícil que se pueda alcanzar.

Los sistemas híbridos solar-biomasa constituyen por tanto una alternativa descentralizada para la cobertura de la demanda térmica en el sector edificación con energías renovables. Pero como hemos visto en el análisis anterior,

el óptimo económico se inclina hacia la sustitución del aporte solar por biomasa, y en el mejor de los casos, con una gran reducción en los costes de la inversión solar, podríamos llegar a un óptimo económico en que la energía solar se hiciera cargo del orden del 25% de la demanda, y quedar el resto para la biomasa. Es decir, con o sin aporte solar la principal fuente energética usada en estos sistemas es la biomasa. Sin embargo, tal y como detallaremos más adelante, el recurso de biomasa en nuestro país resulta muy escaso en relación a la demanda potencial, y al haber aplicaciones energéticas en las que el uso de la biomasa es prácticamente la única alternativa de origen renovable y coste limitado, no parece adecuado invertir este recurso para aplicaciones energéticas, como es la cobertura de la demanda térmica en el sector edificación, que admiten otras opciones de cobertura con energía renovable.

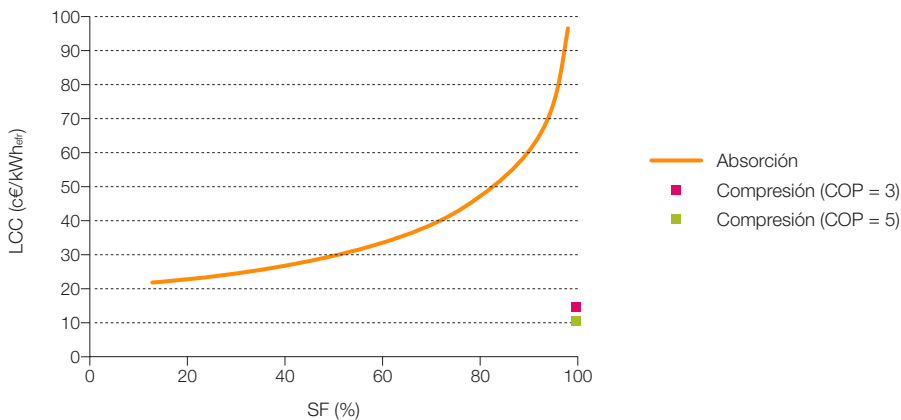
Otra opción que resulta interesante analizar para el caso de la solar térmica es su aplicación en refrigeración solar. En (García-Casals, X., 2006-2) se analizan los aspectos económicos de la refrigeración solar distribuida autónoma (al emplear energía solar térmica de baja temperatura), de forma comparativa con la otra alternativa solar, que denominaremos centralizada, y que en general consiste en la generación centralizada de electricidad con energías renovables y el uso de bombas de calor para refrigerar los edificios empleando esta electricidad de origen renovable.

En la figura 43 mostramos la comparación del coste normalizado de la energía de refrigeración obtenida para un caso optimista para la solar térmica distribuida. En efecto, consideramos que la electricidad renovable procede de centrales termosolares con un LEC de 25 c€/kWh, valor considerablemente superior al potencial que ofrece esta tecnología

<sup>144</sup> El que se alcanza para una superficie de 20 m<sup>2</sup>.

**Figura 43.** Comparativa de los costes de refrigeración solar mediante un enfoque centralizado (electricidad de una central termosolar con  $LEC = 25 \text{ c€/kWh}$  y un 15% de sobrecoste adicional para el usuario, empleando enfriadoras de compresión con  $COP = 3$  y  $COP = 5$ ), y el enfoque descentralizado basado en solar térmica distribuida (a un coste de  $600 \text{ €/m}^2$  para el sistema solar) y una enfriadora de absorción de simple efecto con coste de  $700 \text{ €/kW}$ , y gas natural a  $4,8 \text{ c€/kWh}$  PCS con una caldera del 90% de rendimiento estacional como fuente auxiliar (García-Casals, X., 2006-2).

$LEC_{\text{termosolar}} = 25 \text{ c€/kWh}$ ; inversión máquina absorción =  $700 \text{ €/kW}$ ; inversión sistema solar =  $600 \text{ €/m}^2$



(GP, 2007) y al que ya ofrecen en la actualidad otras tecnologías renovables como la eólica. Además, suponemos que el coste para el usuario final de esta electricidad es el valor de este LEC incrementado en un 15%, es decir, que la electricidad le cuesta al usuario prácticamente  $29 \text{ c€/kWh}$ . Para las máquinas de refrigeración de compresión hemos considerado valores del COP representativos de los valores que actualmente podemos encontrar en el mercado para máquinas aire-aire de pequeño tamaño ( $COP = 3$ ), y para máquinas con mejores prestaciones que cabe esperar que estén disponibles en el futuro próximo<sup>145</sup> dentro del mismo segmento de mercado, o que se encuentran ya disponibles en el caso de recurrir a máquinas refrigeradas por agua ( $COP = 5$ ). La inversión del sistema solar térmico de baja temperatura la consideramos de  $600 \text{ €/m}^2$ , y

el coste de inversión de la máquina de absorción de simple efecto lo consideramos<sup>146</sup> de  $700 \text{ €/kW}$ .

En estas condiciones, la figura 43 compara el coste normalizado de la refrigeración (LCC) en función de la fracción solar alcanzada por el sistema solar térmico distribuido. Como podemos observar, en todo el rango de valores el coste del sistema solar autónomo es considerablemente superior al del sistema solar centralizado, y especialmente si le exigimos al sistema solar autónomo que proporcione fracciones solares del orden de la que alcanzamos al emplear electricidad de origen renovable de la red eléctrica ( $SF = 100\%$ ), en cuyo caso el coste del sistema autónomo es más de 10 veces superior al del centralizado. En estas condiciones parece difícil de

<sup>145</sup> Como ya hemos comentado anteriormente, en el caso de las pequeñas enfriadoras domésticas, ya existen estándares con COP del orden de 6, y para el caso de recurrir a enfriadoras agua-agua, ya disponemos en el mercado de enfriadoras con COP del orden de 8.

<sup>146</sup> Es importante apreciar que por las fechas de publicación de (García-Casals, X., 2006-2) las ofertas comerciales de enfriadoras de absorción de pequeño tamaño estaban en el orden de  $2.000\text{-}3.000 \text{ €/kW}$ .

justificar la aproximación autónoma de la refrigeración solar frente a la opción centralizada, que por otro lado conlleva una instalación y operación mucho más sencilla.

Por tanto, podemos concluir que en un contexto E3.0 en el que en la red eléctrica disponemos del 100% de generación de origen renovable, y en el que además, debido a los requerimientos de regulación del sistema eléctrico, contamos con electricidad residual de origen renovable, a diferencia de lo que sucede en un contexto como el actual o el BAU, la solar térmica de baja temperatura no aparece como la opción tecnológica más adecuada para cubrir con renovables la demanda de energía térmica. Es más, la solar térmica de baja temperatura, al constituir el aporte energético prioritario una vez implementada en un sistema, introduce una importante rigidez en el sistema energético que acota el alcance potencial de la GDE para regular dicho sistema. Desde esta perspectiva, tampoco parece la opción tecnológica más apropiada.

En el sector edificación donde la demanda térmica es de baja temperatura, dentro del contexto E3.0, parece por tanto que el primer recurso energético a incorporar para la cobertura de la demanda térmica es la electricidad “residual” procedente de la necesidad de regulación del sistema eléctrico. El aprovechamiento eficiente de esta electricidad residual conlleva la aplicación de bombas de calor, y puesto que este equipo ya se encuentra por tanto incorporado al edificio, la solar térmica debe buscar sinergias positivas con las bombas de calor para poder justificar su aportación. La justificación económica de la solar térmica de baja temperatura para cubrir a la demanda térmica del sector edificación quedaría por tanto condicionada por los siguientes elementos:

- La reducción en su CF por la incorporación prioritaria de la electricidad residual, lo cual conduce a un incremento del coste de la energía de origen solar.
- El coste de la generación térmica vía bombas de calor eficientes con electricidad no residual.
- La reducción de la demanda de ACS a cubrir con solar térmica como consecuencia de la recuperación energética<sup>147</sup> en las bombas de calor en modo refrigeración.

Si nos basamos en los resultados que hemos mostrado, parece que sería precisa una gran reducción del coste de inversión de la solar térmica<sup>148</sup> para que su incorporación como parte de la solución tecnológica en el sector edificación quedara justificada desde el punto de vista económico. Sin embargo, hay dos argumentos que pueden conducir a modificar esta conclusión desde el punto de vista de la consideración de la participación de la solar térmica para la cobertura de la demanda del sector edificación en el contexto E3.0:

- El hecho de que durante el proceso de transición desde el contexto BAU al contexto E3.0 la solar térmica de baja temperatura constituye, sin duda, una tecnología apropiada desde la perspectiva de la sostenibilidad, que además se encuentra incorporada en la regulación energética actual (CTE) como una exigencia de obligado cumplimiento en la construcción de nuevos edificios. Por tanto, cabe esperar que al llegar a completar la transición hacia el contexto E3.0 exista ya un importante parque de colectores solares térmicos integrado en los edificios.
- Las opciones que la solar térmica puede ofrecer para mejorar el comportamiento de las bombas de calor, de tal forma que

**147** En efecto, en modo de operación de refrigeración, la bomba de calor disipa calor residual al entorno, y parte de este calor residual es susceptible de ser aprovechado para la producción de ACS. Para no empeorar el rendimiento de la bomba de calor aumentando la temperatura del foco caliente, en modo refrigeración hasta alcanzar los valores requeridos por la generación de ACS, actualmente las bombas de calor domésticas que incorporan esta capacidad emplean la energía disponible asociada al sobrecalentamiento del gas a la salida del compresor.

**148** Así como una simplificación de la instalación y operación de estas instalaciones, y una modificación de los planteamientos asociados a la incorporación de esta tecnología para que se garantizaran sus prestaciones durante la vida útil de la instalación.

la asociación solar térmica-bomba de calor pase a constituir una combinación sinérgica en lugar de una competencia directa. Y en efecto, existen distintas opciones para alcanzar estas sinergias entre ambas tecnologías:

- Sistemas de bomba de calor geotérmica de alta eficiencia y sinergias con solar térmica:

Las bombas de calor geotérmicas (GSHP<sup>149</sup>), además de la mejora de la eficiencia energética del suministro de calor y frío<sup>150</sup>, proporcionan la ventaja frente a otras bombas de calor de evitar la mala estética<sup>151</sup> de los aerocondensadores<sup>152</sup>. Sin embargo la sostenibilidad de esta tecnología pasa por cuadrar los balances anuales de energía extraída e introducida en el terreno. De no hacerlo así, al ir pasando los años va empeorando el rendimiento del sistema hasta llegar a un punto en el que no resulte ventajoso desde un punto de vista energético frente a otras opciones, motivo por el cual su mayor coste de inversión<sup>153</sup> dejaría de estar justificado.

Por otro lado, la energía solar térmica, tal y como hemos comentado anteriormente, puede encontrarse con serias limitaciones para su desarrollo en el escenario probable al que nos dirigimos, de elevada penetración de renovables en el sistema de generación eléctrica. En efecto, en estas condiciones la solar térmica competiría con electricidad “residual” del sistema de generación que podría usarse de forma muy eficiente mediante bombas de calor para cubrir las necesidades de energía térmica, en unas condiciones donde lo prioritario ya no sería el usar el aporte solar térmico, sino el valorizar la energía eléctrica residual, lo cual obligaría a aumentar la ca-

pacidad de almacenamiento del aporte solar local. En estas condiciones parece muy adecuado impulsar sinergias de la solar térmica de baja temperatura con las bombas de calor geotérmicas: la solar térmica puede emplearse en este contexto tanto para cuadrar el balance energético anual del terreno en emplazamientos con dominio de la demanda de calefacción<sup>154</sup> (valorizando el aporte solar excedente de verano), como para aumentar el rendimiento de la bomba de calor geotérmica<sup>155</sup>, todo ello mediante la acumulación del aporte solar en el mismo terreno en el que están instalados los pozos geotérmicos, lo cual añade un componente de almacenamiento térmico estacional (UTES<sup>156</sup>) que también favorece mucho la integración de la solar térmica en un contexto donde lo prioritario será valorizar la electricidad residual del sistema de generación eléctrica.

Por tanto, la tecnología GSHP de elevada eficiencia<sup>157</sup>, con almacenamiento en terreno (UTES), e hibridación con otras tecnologías (solar, torre refrigeración) para equilibrar balance anual de calor y frío en terreno, se presenta como una muy buena opción de futuro para la eficiencia energética tanto de los edificios<sup>158</sup> como del sistema de generación eléctrica.

De hecho, este puede ser un gran nicho para solar térmica<sup>159</sup>, al valorizar toda su producción de verano de forma desacoplada de la demanda<sup>160</sup> para cargar el almacén del suelo con energía térmica de cara al invierno. Importante en climas con dominancia de la temporada de calefacción.

- Sistemas de bomba de calor aerotérmica eficientes y sinergias con solar térmica:

**149** GSHP: Ground Source Heat Pumps.

**150** Asociada fundamentalmente a la mejora del nivel térmico de su foco frío (aplicación en calefacción) o caliente (aplicación en refrigeración), al sustituir el aire ambiente por la temperatura del subsuelo, más regular y menos extrema que la del aire exterior gracias a la gestión inercial que el terreno hace del aporte solar en la superficie. Esto proporciona el potencial de mejorar tanto el COP en condiciones de diseño como los valores estacionales del COP. Sin embargo, también es cierto que en la actualidad existen bombas de calor aerotérmicas con mejores prestaciones que las geotérmicas, por no haberse incorporado todavía en estas últimas todos los avances a nivel de componentes.

**151** Sin embargo, debemos tener presente que ante un despliegue a gran escala de la incorporación de las bombas de calor en el sector edificación de una forma planificada, la estética de los intercambiadores ambiente de estos equipos debería evolucionar y alejarse radicalmente de la nefasta estética que tiene la actual incorporación caótica de estos equipos para la cobertura de una demanda de refrigeración que no fue tenida en cuenta al diseñar el edificio. En efecto, la imagen que actualmente podemos apreciar en nuestras ciudades de edificios salpicados con intercambiadores ambiente, para cubrir de forma desordenada la demanda de refrigeración, es una consecuencia directa de la falta de planificación, y no debemos achacarla directamente a la tecnología de bombas de calor. En una aproximación más racional, incluso con la tecnología actual, los intercambiadores ambiente de estas bombas de calor se encuentran ubicados en cubierta, y anulan por tanto su impacto estético. Adicionalmente, queda pendiente un trabajo de desarrollo de estas tecnologías para buscar formas adicionales de integrar estos elementos en la envolvente del edificio con bajo impacto visual.

**152** Sin embargo actualmente requieren un 30-50% más de inversión.

**153** Asociado en gran parte a la implementación del intercambiador con el terreno.

**154** Lo cual cubre la gran mayoría de las zonas climáticas peninsulares.

**155** El aporte solar incrementa el

La tecnología GSHP no siempre es aplicable. Cuando esto sucede, las bombas de calor aerotérmicas (ASHP<sup>161</sup>) de elevada eficiencia constituyen una de las mejores soluciones desde el punto de vista energético<sup>162</sup>.

Y también en el campo de las bombas de calor aerotérmicas cabe la opción de explorar sinergias del acoplamiento con sistemas solares térmicos, para buscar esquemas de operación ganadores que no quiten nicho de mercado a la solar térmica y que beneficien la operación de las bombas de calor<sup>163</sup>. Sin embargo, a diferencia de la opción del acoplamiento con las GSHP, en el caso de las ASHP el beneficioso elemento del almacenamiento estacional es más complejo de incorporar.

Otra opción de desarrollo sinérgico que puede favorecer la incorporación de la solar térmica en el sector edificación dentro de un contexto E3.0 lo constituyen los colectores solares mixtos térmica / fotovoltaica. La idea de juntar en un único componente las funciones de un módulo fotovoltaico y de un colector solar térmico viene de antiguo. Pero, los bajos rendimientos alcanzados en el sistema térmico sin empeorar el comportamiento del sistema fotovoltaico, no han permitido que la aplicación encontrara un nicho de mercado. Sin embargo, es una tecnología que presenta sinergias interesantes: por un lado, la refrigeración del módulo fotovoltaico permite aumentar la generación eléctrica del mismo, especialmente en las temporadas de mayor irradiación solar. Por otro lado, esa “refrigeración” del módulo fotovoltaico proporciona una generación de calor útil susceptible de ser empleada en el edificio en el que se encuentra instalado el módulo fotovoltaico. En un contexto E3.0 en el que la generación fotovoltaica distribuida en los edificios parece llamada a jugar un papel importante en la integración de

renovables en el sistema de generación, es posible que la solar térmica de baja temperatura acabe compitiendo por espacio con la solar fotovoltaica. En estas condiciones, el poder juntar ambas aplicaciones en el mismo sistema cobraría todavía más sentido. De hecho, recientemente está volviendo a cobrar gran atención este concepto. Una de las opciones que parecen más interesantes es precisamente la de emplear esta tecnología acoplada a una GSHP con un UTES, de tal forma que la generación de calor útil que producen los colectores mixtos se pueda emplear para recargar térmicamente el terreno desde el que capta la energía térmica la GSHP en temporada de calefacción. Otra aplicación a explorar sería la integración arquitectónica (BIPV) en fachadas ventiladas con una recuperación energética en el flujo de aire. También existe la posibilidad de aplicar esta tecnología junto a las estrategias de iluminación natural de espacios, al colocar los colectores en una fachada ventilada con vidrio interior altamente opaco a fracción no visible: el aire calentado se puede usar en verano<sup>164</sup> para ventilación natural y en invierno para calefacción.

Como consecuencia de todo lo anteriormente comentado, y a pesar de que dentro de un contexto E3.0 podría resultar difícil justificar desde un punto de vista económico la participación de la solar térmica para la cobertura de la demanda térmica del sector edificación, consideramos que hay bastantes argumentos para incorporarla dentro del mix tecnológico del contexto E3.0. Por tanto, vamos a considerar en el escenario del contexto E3.0 que la solar térmica se encuentra incorporada en el sector edificación para la cobertura de la fracción de la demanda de ACS que marca la HE4 del CTE en la actualidad.

El otro sector en el que la solar térmica distribuida puede participar es el sector industria,

nivel térmico del foco frío en modo calefacción, por lo que aumenta el rendimiento térmico de la bomba de calor en condiciones de calefacción. Este aspecto, al aplicarlo más allá del balance anual de energía en el terreno para conseguir mantener las condiciones térmicas del terreno, debe buscar un equilibrio entre la mejora del rendimiento en modo calefacción y el empeoramiento en modo refrigeración.

**156** UTES: Underground Thermal Energy Storage.

**157** En un UTES la HP no siempre tiene que funcionar: a bajas cargas opera solo el intercambiador con el terreno sin necesidad de arrancar el compresor de la bomba de calor.

**158** Según ETP2008 de AIE, el objetivo de regiones frías debe ser *passive house* para 2015. En la actualidad, este objetivo puede quedarse incluso corto frente al potencial de eficiencia que se está intentando impulsar en los edificios para esas fechas, acercándose a los edificios de consumo prácticamente nulo (la Directiva 2010/31/EU pretende que los edificios nuevos sean de consumo prácticamente nulo para el año 2010, aunque desafortunadamente se les olvidó definir con precisión qué quiere decir eso del consumo prácticamente nulo). El desarrollo de esta tecnología, junto con integración fotovoltaica, podría ayudar mucho a alcanzar estos objetivos de edificios de consumo energético nulo.

**159** Como ejemplo, podemos citar la gran expansión reciente en China de la aplicación de esta tecnología desde el año 2007.

**160** Y, por tanto, sin introducir rigidez sobre el sistema energético para la regulación de la producción eléctrica mediante DSR.

**161** ASHP: Air Source Heat Pumps.

**162** Sin embargo, la mayoría de bombas de calor que siguen instalándose en nuestro país tienen unos rendimientos considerablemente inferiores a los que se podrían alcanzar. A modo de referencia, el estándar japonés para 2010 de los equipos de aire acondicionado de pequeña potencia es alcanzar rendimientos de COP = 6.32, mientras que muchos de los equipos que se siguen comercializando en España tienen COP ≈ 3 (de hecho para COP > 3 ya se alcanza la clase-A de la calificación energética). El COP puede incluso progresar más allá de estos valores si se procede a centralizar la producción de frío y calor a nivel edificio o barrio.

dentro del cual encontramos tanto demanda de energía térmica de baja temperatura, como de media y alta temperatura.

Por lo que respecta a la demanda térmica de baja temperatura, podríamos hacer consideraciones parecidas a las anteriormente expuestas para el sector edificación<sup>165</sup>: Las bombas de calor constituyen la opción tecnológica más eficiente para el aprovechamiento en primera instancia de la electricidad “residual” asociada a la regulación del sistema eléctrico, y contribuir por tanto a la regulación del sistema energético integrado, y una vez incurrido este coste de inversión, la opción más favorable para la cobertura del resto de la demanda térmica de baja temperatura será el uso de electricidad del sistema de generación renovable.

Pero al incrementar el nivel térmico de la demanda, las bombas de calor van empeorando sus prestaciones, por lo que en el campo de la demanda de media y alta temperatura dentro del sector industrial ya no son aplicables. En estas condiciones, el aprovechamiento de la electricidad “residual” asociada a la regulación del sistema eléctrico debe hacerse por efecto resistivo<sup>166</sup> puro, que debido a su menor rendimiento aumenta el potencial de integración de la solar térmica para cubrir parte<sup>167</sup> de la demanda restante. Sin embargo, la realidad es que la incorporación de la solar térmica distribuida para esta aplicación añade una considerable rigidez<sup>168</sup> al sistema energético, lo cual trae como consecuencia que las aplicaciones en las que a priori pudiera ser justificable, se limiten a aquellas en las cuales se presente un buen acoplamiento<sup>169</sup> entre el aporte solar térmico distribuido y las necesidades de regulación del sistema eléctrico. Donde no se den estas condiciones, en principio resultaría más apropiado el plantear un esquema basado en la

biomasa y la electricidad residual, combinación que por sí misma proporciona suficiente elasticidad<sup>170</sup> para garantizar la cobertura de la demanda en cualquier situación, y que por tanto parece más apropiada<sup>171</sup>.

Por tanto, parece que el nicho de la solar térmica en el sector industrial puede verse también considerablemente reducido, y su única opción de una implementación a gran escala parece que queda limitada al hecho de que la combinación biomasa-electricidad “residual” en el campo de la media y alta temperatura condujera a una elevada demanda de biomasa, que en nuestro país constituye un recurso renovable muy escaso y con demanda estratégica en el contexto E3.0 para otros sectores, como es el sector transporte. Por este motivo la solar térmica en el sector industrial puede adquirir sentido desde la perspectiva de conservación del recurso biomasa para aquellas aplicaciones en que no admita una fácil sustitución por otros recursos provenientes de fuentes renovables. En este caso, la solar térmica debería competir a nivel de costes con la opción hidrógeno procedente de electricidad renovable<sup>172</sup> y electricidad “residual”.

Por último, una opción prioritaria para el uso de la energía solar térmica en la industria (baja y media temperatura<sup>173</sup>), lo constituiría la posibilidad de hacer coincidir geográficamente la implementación de instalaciones industriales y de centrales solares termoeléctricas, de tal forma que éstas pudieran funcionar de forma cogenerativa aprovechando el calor residual del foco frío del ciclo de potencia.

#### 2.6.3.4 Sector transporte

Tal y como analizaremos con detalle más adelante, la electrificación del sector transporte resulta fundamental para contraer la demanda

En efecto, al emplear máquinas de gran tamaño, ya incluso hoy en día nos encontramos con enfriadoras que a carga parcial ofrecen COP > 11.

**163** En este contexto, el desarrollo de bombas de calor aptas para beneficiarse del efecto de un mayor nivel térmico en el evaporador sería el objeto de una alianza estratégica entre fabricantes de equipos solares y de bombas de calor. En la actualidad las bombas de calor de pequeña potencia para aplicaciones domésticas tienen limitada la temperatura máxima del evaporador en modo calefacción en valores muy bajos que impiden desplegar el tremendo potencial desde el punto de vista de la eficiencia que tendría el incorporar el aporte solar térmico en el evaporador de la bomba de calor. El motivo tecnológico es que emplean compresores herméticos que se enfrían con el gas refrigerante. En grandes máquinas donde los compresores cuentan con refrigeración externa no existe esta limitación, pero puesto que las bombas de calor no están diseñadas para trabajar en estas condiciones, el potencial de mejora en las prestaciones se ve a menudo saturado en valores muy inferiores a lo que podría desarrollar. Sería necesario adaptar el diseño y controles de las bombas de calor para poder sacar todo el beneficio a este acoplamiento con la energía solar térmica. Otro punto en el que puede surgir un nicho de sinergia es en las condiciones de operación que conducen a la producción de hielo en el evaporador de la bomba de calor en condiciones de calefacción. En estas situaciones, las bombas de calor activan un ciclo de desescarche que reduce de forma muy importante su COP. El aporte solar térmico podría emplearse para evitar las condiciones de producción de hielo en el evaporador, y proceder a precalentar el aire antes de su entrada en el intercambiador de la bomba de calor. Esta aplicación podría tener sentido en emplazamientos de elevada severidad climática de invierno, lo cual excluye bastantes zonas climáticas de España. En emplazamientos de menor severidad climática esta aplicación no resulta ventajosa (García-Casals, X., 2004-2).

**164** En verano, el añadir evaporación mejoraría la capacidad de refrigeración del módulo fotovoltaico, y puede conducir a una mejora del desempeño colector FV/ST.



energética de este sector y mantenerlo dentro de los límites de la sostenibilidad.

En el modo carretera, el dominante desde el punto de vista tanto de la cobertura de la demanda de movilidad de viajeros y mercancías, como del consumo energético, la electrificación es un concepto ganador desde múltiples puntos de vista:

- Permite incrementar de forma notable la eficiencia energética.
- Permite acceder al conjunto de recursos de energías renovables, al liberar los requerimientos sobre la biomasa, uno de los recursos renovables más escasos en nuestro país.
- Permite que el sistema eléctrico acceda a un importante potencial de regulación que facilita la integración de energías renovables en el sistema.

De hecho, la electrificación del modo carretera, junto al despliegue de inteligencia en el sector transporte, llega a ser tan importante que nos obliga a reconsiderar los planteamientos actuales de eficiencia, en los que fundamentalmente se busca impulsar un cambio modal desde el modo carretera al modo ferrocarril, para acceder a escenarios con un potencial de eficiencia tremendamente superior a lo que permite el desplazamiento modal anteriormente comentado<sup>174</sup>.

## 2.7 Mix 100% renovables en el contexto E3.0

En el informe (GP, 2007) analizamos la viabilidad técnica y económica de cubrir la demanda de energía eléctrica con energías renovables. En ese caso se trataba del primer

análisis de la viabilidad de los sistemas eléctricos 100% renovables, por lo que se adoptó el planteamiento conservador de no involucrar a la demanda en la operación del sistema eléctrico, es decir, se empleó un enfoque convencional desde el lado de la oferta en el que todo el peso de la operación y regulación del sistema caía sobre las centrales de generación, y en el que la demanda evolucionaba de forma ciega a los requerimientos del sistema de generación. Evidentemente este planteamiento original está lejos del óptimo en el que debe operar un sistema energético inteligente, pero cumplía el objetivo de mostrar que incluso en estas condiciones altamente desfavorables era factible y viable operar un sistema eléctrico alimentado exclusivamente con energías renovables, que regule de forma convencional desde el lado de la generación y con todas las garantías requeridas para la cobertura de la demanda, y por tanto no era preciso esperar a que tuviera lugar ningún cambio radical en la forma de responder de la demanda para iniciar la transición hacia un sistema 100% renovable.

Bastantes cosas han sucedido desde que en el año 2007 se publicara el informe *Renovables 100%* (GP, 2007), y una de ellas es que la mayor parte de los actores de nuestra sociedad han empezado a percibir claramente por primera vez la urgencia de la transición hacia un sistema energético 100% renovable, habida cuenta de los requerimientos ya incuestionables<sup>175</sup> que nos impone nuestro sistema climático. Y en esta tesitura se ha empezado a focalizar de forma intensa la mirada en el desarrollo y despliegue de las redes inteligentes. Ahora, a diferencia del planteamiento mayoritario establecido en 2007, resulta evidente que la demanda debe tomar un papel activo muy importante para facilitar la transición de nuestro sistema en los cortos plazos de tiempo disponibles.

**165** De hecho, en el sector industrial la demanda de calor se extiende a todo el año, por lo que en verano el rendimiento con el que actúan las bombas de calor es todavía más elevado.

**166** Al aprovechar la electricidad por efecto Joule, tenemos COP = 1.

**167** De hecho, en este esquema el planteamiento debería ser para cubrir el total de la demanda con solar térmica y efecto Joule asociado principalmente a la regulación del sistema eléctrico, pues de lo contrario sería preciso incorporar una tercera tecnología, que en el contexto E3.0 tan solo podría ser la biomasa, para proporcionar la necesaria garantía de suministro. Y una vez incurrida la inversión en el sistema de biomasa, la solar térmica ya no sería justificable.

**168** En el sentido de que el aporte solar térmico sobre el sistema de acumulación térmica pasa a ser prioritario, reduciendo el campo de aplicación de la DSR para regular el sistema eléctrico.

**169** Es decir, que la cobertura de la demanda se pueda garantizar con suficiente fiabilidad empleando el aporte solar descentralizado y electricidad "residual", lo que requiere una limitada participación de electricidad no "residual" para proporcionar la garantía de resultados.

**170** Esta elasticidad se ve reducida cuando se imponen condiciones de eficiencia sobre el uso de un recurso escaso como es la biomasa, lo cual requeriría su aplicación cogenerativa, que en el contexto E3.0 debería ir guiada por las necesidades del sistema eléctrico. Sin embargo, incluso en este caso resulta una combinación tecnológica más favorable que la de la solar térmica distribuida y la electricidad "residual", pues proporciona capacidad de regulación hacia arriba y hacia abajo a la GDE de ese sector industrial de forma complementaria: En efecto, cuando el sistema eléctrico requiere más generación eléctrica (regulación hacia arriba), arrancaría la cogeneración proporcionando por un lado esa electricidad y obteniendo por otro lado el calor demandado por la aplicación industrial, y cuando el sistema eléctrico tuviera capacidad de generación excedentaria (regulación hacia abajo), la demanda térmica de la industria se cubriría empleando esa electricidad "residual" (DSR).

**171** Para el caso de demanda térmica de media temperatura

Y el hecho de que en el contexto E3.0 la demanda aparezca como un actor muy importante en la operación del sistema energético, modifica significativamente las condiciones de contorno en las que se va a desarrollar el mix de generación 100% renovable, motivo por el cual cabe esperar que la composición de esos mix 100% renovables puedan experimentar modificaciones significativas.

Otros hechos que pueden afectar a la configuración de los mix de generación 100% renovables son los siguientes:

- A diferencia de en el informe *Renovables 100 %* (GP, 2007), ahora consideramos el sistema energético total, con una gran electrificación del sistema energético, y muchos grados de participación de la DSR<sup>176</sup> en distintos subsectores gracias a la inteligencia desplegada por los sistemas energético y económico.
- Los recursos de biomasa en el contexto E3.0 deben emplearse de forma prioritaria para aquellos subsectores energéticos en los que la participación de otras renovables requiere incurrir en pérdidas de rendimiento significativas por apoyarse en otro vector energético (como el hidrógeno), y como complemento a la regulación del sistema una vez apuradas las posibilidades de la regulación desde el lado de la demanda.
- La fotovoltaica ha demostrado unos ritmos de implementación muy elevados, del orden de los requeridos para materializar la transición del sistema energético en los plazos disponibles.
- La solar termoeléctrica no ha conseguido acercarse a los ritmos de crecimiento requeridos, y a lo largo del año 2009 recibió un frenazo de grandes proporciones por el lado de

la administración<sup>177</sup>, que de forma totalmente incomprensible a la luz de los requerimientos actuales<sup>178</sup>, ha paralizado su desarrollo hasta más allá del año 2013. Debido a las grandes inercias asociadas al desarrollo de la tecnología termosolar, este frenazo justo en la etapa de despegue inicial, junto con la sensación de inseguridad regulatoria que ha transmitido nuestra administración, y la escasez a nivel internacional de recursos financieros para abordar este tipo de centrales, probablemente traiga como consecuencia que la tecnología termosolar no pueda desempeñar el papel que se esperaba de ella.

Para focalizar mejor esta situación, recopilamos a continuación algunos resultados de los anteriores trabajos que analizaban los sistemas de generación 100% renovables:

La figura 44 muestra el despacho de generación para un mix 100% renovable, optimizado económicamente, para cubrir la demanda del escenario 2050 en el informe *Renovables 100 %* (GP, 2007). Como podemos ver se trata de un mix energético relativamente poco diverso, donde la tecnología eólica terrestre, respecto a su situación inicial de partida como a su curva de evolución de costes prevista, domina la generación. En segundo lugar aparecía la tecnología termosolar híbrida con biomasa (el aporte de biomasa que aparece como cuarta contribución es el correspondiente a la hibridación), que junto a la hidroeléctrica regulada y el bombeo hidroeléctrico proporcionaba la capacidad de regulación del sistema eléctrico desde el lado de la generación. El resto de tecnologías que aparecen son la minihidráulica y la hidráulica fluyente que ya existen en la actualidad. Como vemos, en este mix de generación, tanto por costes como por incapacidad de contribuir a los requerimientos de regulación no aparecen el resto de las tecnologías renovables, y en particular no hay

(hasta 400-500 °C), la combinación ideal sería la cogeneración basada en biomasa con la electricidad "residual" del sistema eléctrico: integración total del sistema energético con capacidad de regulación hacia arriba y hacia abajo. Para el caso de la demanda térmica de alta temperatura, la cogeneración ya no permitiría alcanzar niveles térmicos suficientes, por lo que debería emplearse electricidad "residual" por efecto Joule junto con combustión de la biomasa.

**172** Esta combinación también presenta una mejor integración con el sistema energético total, pues el hidrógeno se podría generar también basándose en electricidad "residual", y en su aplicación dentro de la industria, en el campo de la media temperatura permitiría un enfoque cogenerativo que proporcionaría, al igual que la biomasa, un potencial de regulación hacia arriba.

**173** Para los ciclos de potencia actualmente implementados en las centrales termosolares (ciclo de vapor de agua), el alcance quedaría limitado a la baja temperatura para no perjudicar el rendimiento eléctrico. Sin embargo, en el futuro, con la aplicación de ciclos de turbina de gas alimentados por receptores solares de torre, esta aplicación podría extenderse a la media temperatura.

**174** Esta afirmación no implica que haya que abandonar la presión para materializar este desplazamiento modal tanto como sea posible, que tanto para el proceso de transición como para el contexto E3.0 constituye una estrategia adecuada. Simplemente resalta el hecho de que la electrificación e introducción de inteligencia en el transporte por carretera libera grados de libertad y eficiencia adicionales que a su vez pueden facilitar un mayor alcance del desplazamiento modal hacia el ferrocarril al acercarlo a la demanda.

**175** El cuarto informe del IPCC publicado en 2007 planteó ya de forma incuestionable este hecho, y la evolución del sistema climático en los dos años siguientes, que aceleró considerablemente los efectos que predecían los modelos, ha hecho crecer la conciencia sobre la urgencia del proceso de cambio requerido.

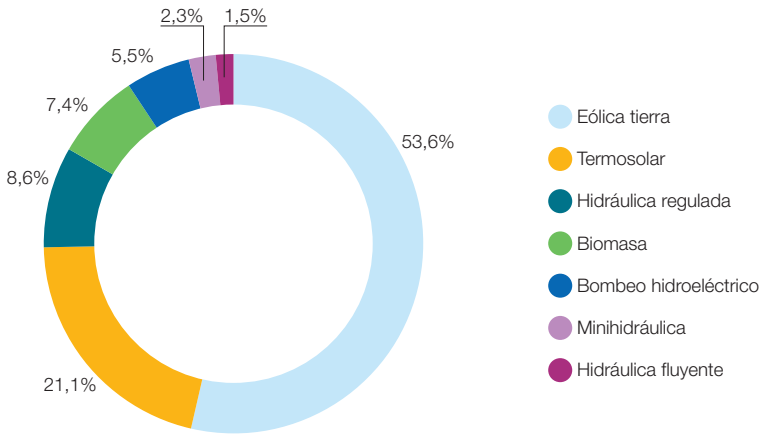
**176** DSR: Demand Side Response. La gestión de la demanda participando de forma activa en la operación del sistema energético.

**177** La solar fotovoltaica también ha recibido un frenazo parecido

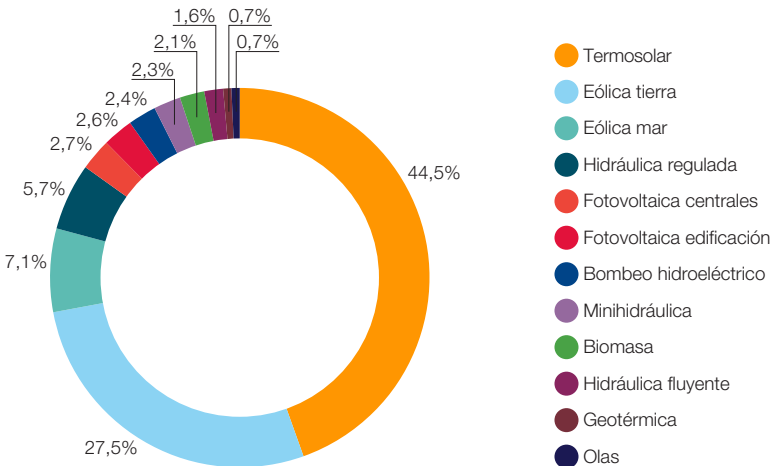
contribución alguna de la fotovoltaica. Ya en el marco del informe (GP, 2007), apuntábamos a que más allá de la optimización técnica

y económica, parecía recomendable apuntar a una mayor diversidad de los mix de generación basados en renovables.

**Figura 44.** Despacho de la generación para un mix 100% renovable optimizado económicamente (García-Casals, X., 2006) para el sistema eléctrico peninsular (demanda eléctrica 280 TWh/a).



**Figura 45.** Despacho de la generación para el mix 100% renovable planteado en (García-Casals, X., 2009) para el sistema eléctrico peninsular bajo el escenario de demanda media (280 TWh/a).



por el lado de la administración, pero su carácter modular y menores tiempos de desarrollo de las centrales de esta tecnología hacen pensar que tendrá una mayor capacidad de recuperación.

**178** Realmente resulta increíble que tan solo un par de años después de la publicación del informe *Renovables 100%*, hayamos podido constatar que prácticamente todos los ingredientes necesarios para desarrollar un escenario 100% renovable (tecnología, industria, capacidad de financiación, etc.) han demostrado estar a la altura de las necesidades para materializar el proceso de recuperación. Los únicos elementos que no han estado a la altura de las circunstancias, y que de hecho se han manifestado como una barrera de grandes proporciones para hacer posible el cambio, han sido los sistemas administrativo y político, es decir, aquellos que deberían estar en primera línea intentando catalizar el proceso de cambio. Esto es una clara indicación de la urgencia en introducir inteligencia en estos sistemas.

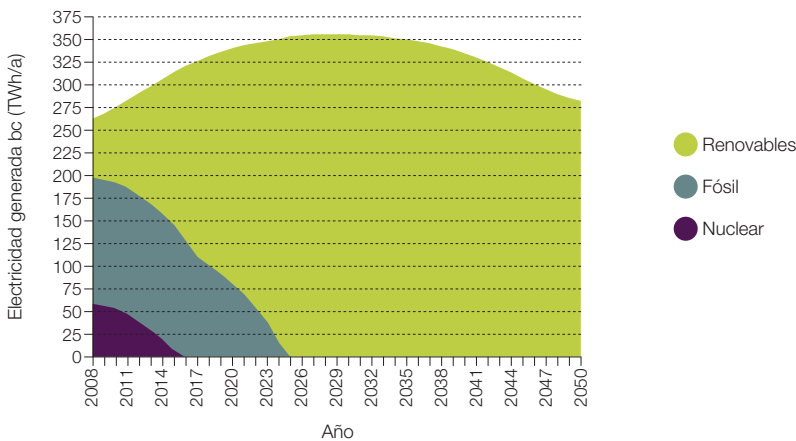
En (García-Casals, X., 2009) se analizaron los sistemas de generación basados en renovables, y se desarrollaron escenarios del proceso de transición del mix de generación desde su situación actual hasta alcanzar el 100% renovable, de cara a poder poner fechas a las posibilidades de sustitución de las centrales nucleares y fósiles.

Una vez más se trataba de un análisis convencional, en el que la demanda se suponía ciega a los requerimientos del sistema energético, y los recursos para la regulación del sistema procedían en su totalidad del lado de la generación. En la figura 45 podemos ver el despacho del mix para el escenario de demanda eléctrica media<sup>179</sup> (280 TWh/a). Como podemos ver, es un mix energético en el que se ha antepuesto el criterio de diversidad sobre la optimización económica, y que se encuentra dominado por la tecnología termosolar debido

fundamentalmente a la capacidad de regulación del sistema que proporciona, al ser hibridada con biomasa, pero también a la abundancia de su recurso y a su favorable curva de evolución de costes. La fotovoltaica aparece en este mix como la cuarta tecnología renovable por lo que respecta a la cobertura de la demanda, con una contribución del orden de la de la hidroeléctrica regulada, pero muy alejada de las contribuciones de la eólica y la termosolar.

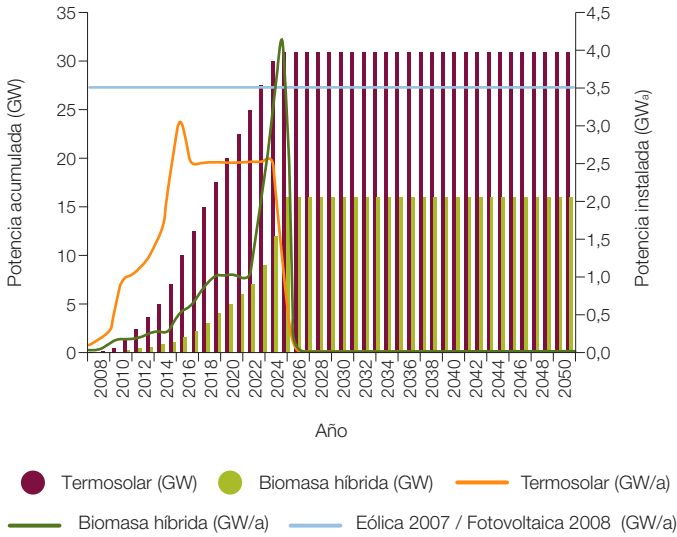
Con el objetivo de desarrollar este mix de cara a la cobertura de la demanda eléctrica en el año 2050, y haciendo un uso más intensivo de la hibridación termosolar con biomasa en los años intermedios del escenario para afrontar el pico de demanda eléctrica existente, el escenario de capacidad de sustitución de los parques de generación nuclear y fósil, quedaba como muestra la figura 46, en la que

**Figura 46.** Escenario de evolución del despacho de generación eléctrica planteado en (García-Casals, X., 2009) para el sistema eléctrico peninsular, bajo el escenario de demanda media (280 TWh/a), y con un uso intensivo de la hibridación termosolar con biomasa en la parte media del escenario para acelerar el cierre de las centrales de combustible fósil.



<sup>179</sup> En (García-Casals, X., 2009) se empleaban tres escenarios de demanda eléctrica (baja, media y alta) para acotar las posibles evoluciones de la demanda.

**Figura 47.** Requerimientos de instalación de potencia renovable para desarrollar el escenario de sustitución de las centrales nucleares y fósiles planteado en (García-Casals, X., 2009) para el sistema eléctrico peninsular bajo el escenario de demanda media (280 TWh/a).



como podemos ver se completaba el cierre del parque nuclear en el año 2016 y el del parque fósil en el año 2025.

Y para poder desarrollar este escenario de sustitución de los parques nuclear y fósil, los ritmos de desarrollo de la capacidad renovable de las tecnologías dominantes en este mix son los que aparecen recogidos en la figura 47, donde podemos observar cómo el ritmo de crecimiento anual para la tecnología dominante de este mix, la termosolar, presentaba un pico de potencia anual instalada que quedaba por debajo de los máximos de instalación de potencia anual en nuestro país, ya demostrados por las tecnologías eólica y fotovoltaica en años anteriores. Es decir, los ritmos de desarrollo requeridos para materializar un escenario de este estilo son perfectamente alcanzables por la industria de las tecnologías renovables en nuestro país y, como se ha demostrado en el año 2009, la única barrera que puede impedir que

alcancemos estos ritmos de crecimiento es la administración.

Volviendo ahora al contexto E3.0, la liberación de la DSR como recurso de regulación, mediante la distribución de inteligencia por los sistemas energético y económico, modifica significativamente uno de los requisitos previos que condicionaban la configuración de los mix 100% renovables propuestos en los estudios anteriores: en efecto, bajo el contexto E3.0 ya no se impone la restricción de que la regulación deba venir desde el lado de la generación. Y el planteamiento, generalmente aceptado en la actualidad, en relación al despliegue de la inteligencia por la red eléctrica, apunta a que este recurso se considera como imprescindible para materializar la evolución requerida de nuestro sistema energético, y por tanto que debemos contar con él para configurar nuestros mix de generación 100% renovables.

Por otro lado, la gran electrificación del sistema energético planteado en el contexto E3.0 libera gran parte del recurso de superficie de envolvente de los edificios para instalar sistemas solares fotovoltaicos, puesto que la participación de los sistemas solares térmicos de baja temperatura se verá principalmente limitada a la cobertura parcial de ACS a la que opten durante el proceso de transición.

Y por último, la fotovoltaica ha mostrado en el año 2008 su capacidad para alcanzar unos ritmos de crecimiento del orden de los requeridos para materializar la transición del sistema energético en los plazos requeridos, y si bien ha recibido un gran revés de la administración truncando significativamente estos ritmos de crecimiento en el año 2009, la elevada velocidad de respuesta de esta tecnología hace pensar que cuando se eliminen las barreras administrativas pueda volver a implementar esos ritmos de crecimiento<sup>180</sup>.

Por todo lo expuesto en este punto, cabe esperar que en el contexto E3.0 la participación de la fotovoltaica en los mix de generación 100% renovables sea sensiblemente superior a la manejada en estudios anteriores.

## 2.8 Economía sostenible: activación de mecanismos de respuesta rápida

La introducción de inteligencia en el sistema económico constituye uno de los principales mecanismos de respuesta rápida para que el sistema energético evolucione hacia la eficiencia y las renovables. Por el contrario, la ausencia de inteligencia en el sistema económico y su evolución BAU, más allá de privarnos de estos mecanismos de respuesta rápidos, nos somete a una gran fuerza en dirección contraria a la que deberíamos adoptar, anulando con

creces el beneficio que nos pudieran aportar otras medidas encaminadas a estimular la eficiencia, e imposibilitando que abandonemos la senda BAU que nos ha conducido a la situación límite actual.

En efecto, mientras la estructura del sistema económico no se encuentre alineada con los objetivos de eficiencia y sostenibilidad, todas las otras actuaciones en la dirección de promover la eficiencia se quedarán probablemente en un ligero maquillaje sin capacidad de cambio estructural. Pero si conseguimos alinear el sistema económico con estos objetivos, la transición hacia la senda deseada acontecerá a una velocidad muy superior a la de la evolución BAU.

El sistema económico actual descansa completamente sobre la venta de productos, y resulta ciego a la cobertura de los servicios para los que supuestamente se venden esos productos. De hecho, si bajan las ventas de productos, a pesar de que los servicios sigan cubriéndose, se desencadenan contextos de crisis. Esta situación es un caldo de cultivo ideal para que proliferen gran cantidad de ineficiencias en el uso de los recursos, puesto que quien vende los productos no recibe ninguna señal económica positiva en relación a la eficiencia con la que ese producto cubre el servicio demandado, sino más bien todo lo contrario: cuanto más ineficiente sea la cobertura del servicio, a menudo mayor cantidad de producto venderá y mejorará el rendimiento económico de esa actividad empresarial.

En nuestro entorno inmediato podemos detectar multitud de ejemplos de estas ineficiencias estructurales en el uso de los recursos:

- El promotor y constructor que desarrollan un edificio y lo ponen a la venta en el mercado,

<sup>180</sup> Y además, el frenazo administrativo del año 2009 puede incluso tener un efecto positivo al propiciar la maduración del sector, de tal forma que cuando vuelva a alcanzar elevados ritmos de crecimiento, si la inteligencia administrativa acompaña, lo haga de forma más efectiva que en el año 2008.

no tienen responsabilidades ni repercusiones asociadas al consumo de energía ni capacidad de cubrir los servicios de confort y calidad del ambiente interior que ese edificio proporcione a sus usuarios en el futuro. Es más, a menudo la maximización de su beneficio económico pasa por sacrificar tanto la capacidad futura del edificio de cubrir los servicios de confort y calidad ambiente, como por incrementar la energía de operación del edificio como consecuencia de minimizar las inversiones iniciales. En un sistema económico inteligente los ingresos de esta actividad quedarían directamente vinculados a la cobertura de los servicios para los que se adquiere el edificio, por lo que la maximización del beneficio pasaría por minimizar el consumo energético en el ciclo de vida del edificio.

- La compañía comercializadora que nos vende la electricidad en casa, incrementa su beneficio cuanto más electricidad consumamos, y mantiene una estructura tarifaria que desincentiva el ahorro en relación a la potencia instalada, y sin ninguna señal económica para integrar la gestión y respuesta de la demanda en la operación del sistema. En un sistema económico inteligente, los ingresos de esta actividad quedarían vinculados a la cobertura de los servicios para los que se suministra la electricidad, por lo que la maximización del beneficio pasaría por la minimización de la electricidad necesaria, y por la integración de la demanda en la operación del sistema eléctrico.
- El fabricante de coches tiene unos beneficios proporcionales a la cantidad de vehículos vendidos, sin ninguna señal económica positiva relacionada con la eficiencia con la que estos vehículos cubren la demanda de movilidad. De hecho, la situación actual es más bien la contraria: cuanto

menor es el factor de capacidad con que se use ese vehículo, y por tanto menor su eficiencia en la cobertura de la demanda, mayor será el beneficio obtenido. De igual forma, cuanto menor sea la vida útil del vehículo<sup>181</sup>, mayor será el beneficio. En este contexto, las medidas de eficiencia a nivel vehículo se deben introducir por regulación a un ritmo muy por debajo de las posibilidades reales, como situación de compromiso entre las presiones del *lobby* correspondiente y los requerimientos de internalización del impacto ambiental asociado. En un sistema económico inteligente, los ingresos de esta actividad quedarían vinculados a la cobertura de la demanda de movilidad, o incluso más allá, a la cobertura de la accesibilidad, por lo que el beneficio del fabricante de coches se maximizaría al reducir la cantidad de vehículos fabricados para cubrir esa demanda, y al minimizar el consumo energético de operación necesario para cubrir la demanda.

Estos y otros ejemplos similares que podemos identificar a nuestro alrededor, nos ilustran la diferencia estructural entre una economía basada en la venta de productos, que podemos calificar como totalmente carente de inteligencia porque simplemente no va más allá de la elaboración del producto, y una economía basada en prestaciones que incorpora inteligencia para ver e internalizar el efecto global de los productos que elabora.

Pero el sistema económico no es capaz por sí solo de reconvertirse en la dirección de una economía sostenible basada en prestaciones. Para ello precisa de la participación de un sistema político inteligente que articule las señales adecuadas para que puedan echar raíces los planteamientos de economía sostenible, y de un sistema administrativo capaz de gestionar y acompañar esa transición.

**181** Mientras quede dentro de los márgenes aceptables para no espantar al consumidor hacia otro fabricante. La vida útil del vehículo se reduce tanto por el deterioro del mismo, como principalmente por quedar desfasado en relación a los nuevos modelos que aparecen en el mercado.

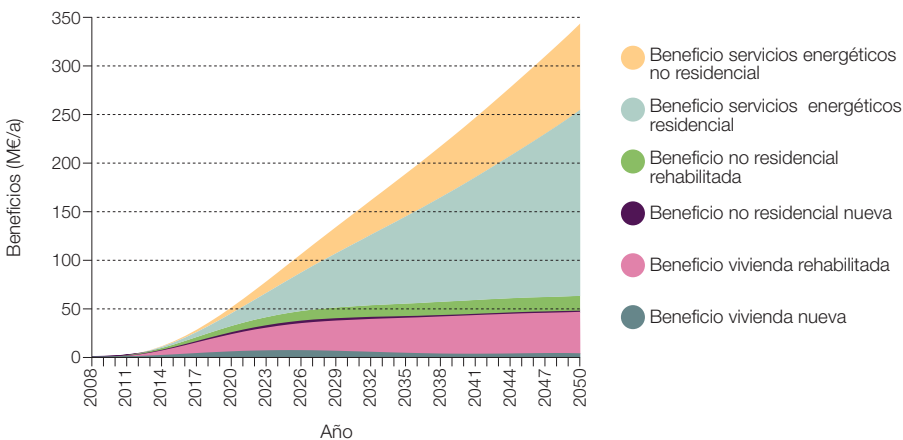
Lamentablemente, esta situación queda muy alejada de las realidades política y administrativa en nuestro país tal y como claramente ha ilustrado el boicoteo y sabotaje del despegue de las energías renovables en España. Pero los sistemas político y administrativo son altamente “renovables”, por lo que en el fondo bastan las señales adecuadas del sistema social para darles un vuelco completo, de tal forma que en última instancia la capacidad de materializar un cambio de este estilo en el sistema económico recae sobre todos y cada uno de nosotros.

Como ejemplos de la estructuración y ventajas de un sistema económico inteligente, hemos recogido aquí algún resultado de (García-Casals, X., 2009) en el que se analizaron tres líneas de negocio de economía sostenible: edificación eficiente, gestión de la demanda del parque edificatorio, y movilidad eficiente. El contexto y alcance de las líneas de negocio analizadas es el de una actividad empresarial que se desarrolla y abarca parte del mercado de una Comunidad Autónoma

(CCAA)<sup>182</sup>, así como el periodo hasta el año 2050.

La figura 48 nos presenta la estructura de beneficios<sup>183</sup> de una empresa dedicada a la edificación eficiente en el contexto en el que nos ha quedado después del paso de la crisis inmobiliaria, que al final del escenario llega a hacerse con el 30% del mercado en esa CCAA. Las líneas de negocio de la empresa son, por un lado, los convencionales de la promoción y venta de edificios residenciales y no residenciales, a la que se añaden las actividades de rehabilitación de edificios que, como vemos, pasan a dominar ampliamente los beneficios dentro de la actividad de “construcción”. Los edificios promovidos por esta empresa presentan un importante diferencial de eficiencia en relación al parque existente y al resto de edificios promovidos en el mercado, por lo que el propio promotor del edificio puede ofrecer como producto la cobertura de los servicios energéticos solicitados en estos edificios con un amplio margen de beneficios, incluso garantizando un

**Figura 48.** Evolución de los beneficios asociados a las distintas líneas de negocio de una empresa dedicada a la edificación eficiente (García-Casals, X., 2009).



<sup>182</sup> En concreto, para estos casos la CCAA analizada fue la de Navarra.

<sup>183</sup> En € corrientes.



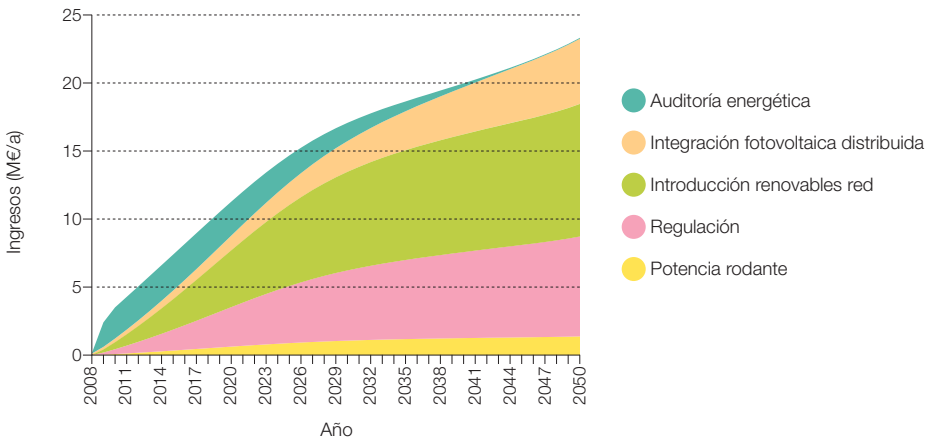
precio fijo y favorable dentro del mercado para el usuario final<sup>184</sup>. A medida que va incrementándose el parque de edificios promovido y operado por esta empresa, las líneas de negocio de cobertura de los servicios energéticos se convierten con gran diferencia en las líneas dominantes en la estructura de beneficios de la actividad empresarial: el beneficio se maximiza con el despliegue de la eficiencia, por lo que este alineamiento entre el sistema económico y los objetivos de eficiencia constituye la mejor garantía para un completo y rápido despliegue de la eficiencia.

En la figura 49 reproducimos el resultado del análisis del desarrollo de las líneas de ingresos de una empresa dedicada a la gestión de la demanda energética del parque de edificios, es decir, un agregador de la demanda, que a lo largo del escenario temporal considerado

llega a abarcar el 30% del mercado en esa CCAA.

El agregador de la demanda y la generación distribuidas, que se sitúa entre medias del consumidor final de electricidad y de las compañías comercializadoras y distribuidoras de energía, articula la integración de la demanda en la operación del sistema a un ritmo y con un alcance muy superior al que se podría aspirar sin la introducción de este nuevo actor. Mediante la agregación de un gran número de pequeños usuarios se configura como una gran central virtual con capacidad de proporcionar servicios complementarios al sistema eléctrico (regulación hacia arriba y hacia abajo, potencia rodante, integración de renovables, etc.) a gran escala y de forma predecible. Mediante la retribución a los usuarios finales de sus servicios de gestión de la demanda articulan el mecanismo de mercado que permite

**Figura 49.** Evolución de los ingresos asociados a las distintas líneas de negocio de una empresa dedicada a la gestión de la demanda (agregación de la demanda) del sector edificación (García-Casals, X., 2009).



<sup>184</sup> Con el valor añadido de estabilidad de precios que esto supone para el usuario del edificio en un entorno de precios energéticos en incremento.

acceder a todo el potencial de la gestión y respuesta de la demanda, y añaden valor a esta capacidad de respuesta de la demanda por su agregación, efecto de simultaneidad, comunicación con el resto del sistema y actuación inteligente en función de las necesidades, lo que proporciona al sistema energético servicios adicionales con una gran flexibilidad que se adaptan perfectamente a las necesidades de un sistema energético basado en renovables.

Además de los servicios complementarios de regulación convencional al sistema eléctrico, destacan en la actividad de esta empresa los servicios de integración de renovables, tanto del resto del sistema energético como de la generación distribuida en su área de actuación. Por lo que respecta al primero, el agregador de la demanda articula la respuesta de la demanda al basarse en la capacidad de generación instantánea de centrales de generación renovable fuera de su ámbito geográfico, de forma genérica a partir de una señal del operador del sistema, o de forma particular mediante contratos bilaterales con

operadores de centrales de generación renovable: cuando hay exceso de capacidad de generación renovable, para evitar la operación en modo regulación por el lado de la generación, se articula la respuesta de la demanda para absorber esa generación “excedente”. Por lo que respecta a la generación distribuida dentro de su ámbito geográfico y contractual, regula la respuesta de la demanda para poder ofertar una generación equivalente gestionable, configurando una central virtual mediante la combinación inteligente entre generación y demanda.

Como podemos observar en la figura 49 aparte de una pequeña línea de negocio basada en las auditorías energéticas, que fundamentalmente sirve para impulsar el lanzamiento de esta actividad hasta disponer de una masa crítica de edificios participando en el programa de gestión de la demanda, el grueso de los ingresos del agregador de la demanda vienen por la prestación de servicios complementarios al sistema eléctrico, y muy especialmente por el servicio de integración de renovables del resto de la red.