Eólica y nuclear, ¿cooperan o compiten?

Cristóbal J. Gallego, Daniel Carralero, Marta Victoria, José Luis Velasco

El Observatorio Crítico de la Energía

1 de Noviembre de 2016

1. Introducción

La batalla por el cambio de modelo energético tiene numerosos frentes. Posicionarse sobre cómo, cuánto y cuándo deben impulsarse las energías renovables obliga a reflexionar sobre diferentes ámbitos, que conviene aclarar y diferenciar en cualquier debate que pretenda ser riguroso. Existen, sin duda, cuestiones **técnicas** (¿es posible un mix 100 % renovable?, ¿o es imprescindible cierto apoyo de otras tecnologías convencionales?[1]), **económicas** (¿cuánto cuestan las renovables?, ¿cuánto costarán el gas, el carbón o el uranio dentro de diez años?), **medioambientales** (¿cómo de urgente es reducir las emisiones de CO_2 y de otros gases contaminantes?, ¿en qué medida es posible hacerlo, y qué consecuencias tiene no hacerlo?) y **sociales** (¿cómo se relaciona la tecnología, las infraestructuras y su propiedad con la sociedad?, ¿qué tipo de empleos se impulsan con las distintas opciones?).

El objetivo del presente informe es aportar una reflexión sobre un tema muy concreto del ámbito técnico. Se trata de la interacción entre la generación de fuentes renovables intermitentes (como la fotovoltaica y la eólica) y la nuclear. En concreto, puesto que la eólica se ha desarrollado más en la última década, nos centraremos en esta tecnología, si bien las conclusiones son válidas para la fotovoltaica, cuyo crecimiento en la próxima década se prevé muy intenso. Es bien sabido que la generación eólica fluctúa a lo largo del tiempo, ya que depende de factores meteorológicos. Como consecuencia, y puesto que la demanda y la generación de electricidad en un sistema eléctrico deben coincidir en todo momento, es necesario combinar la generación eólica con la de otras tecnologías que sí pueden fijarse a voluntad, como es el caso de hidroeléctricas, centrales de ciclo combinado, de biomasa, etc. Por otro lado, la generación nuclear también está sujeta a condicionantes (en este caso, tecnológicos), de modo que las centrales nucleares, en operación normal, proporcionan una generación constante, que no ayuda a cumplir la mencionada condición del sistema eléctrico de generar lo mismo que se consume en cada instante. Por tanto, la presencia tanto de eólica como de nuclear afectan negativamente a la gestión del sistema eléctrico, en el sentido de que hacen necesaria la participación de otras tecnologías que aporten capacidad de regulación. Así, a medida que incluimos un mayor porcentaje de generación nuclear y/o eólica, reducimos el margen de

[1] Para más información, ver [1].

generación proveniente de estas otras fuentes regulables que nos permiten operar el sistema eléctrico correctamente. Como consecuencia, en un escenario de incremento de instalación de energía eólica, el espacio disponible para la necesaria generación regulable iría disminuyendo progresivamente, hasta llegar a un punto límite que exigiría una inevitable elección: continuar con la implantación de eólica solo podría llevarse a cabo *renunciando* a la energía nuclear. Este hilo argumental, que refleja una cuestión puramente técnica, pone en duda el *mantra* de que el mejor mix es el que incluye todas las tecnologías.

Existen, pues, conflictos tecnológicos que aparecerán inevitablemente según la senda que se recorra. Si imaginamos una senda de cambio de modelo energético coherente con la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero proclamada por la comunidad científica, es muy previsible que esta senda vaya acompañada de un aumento de la potencia eólica instalada (además, como se ha mencionado, de fotovoltaica). Si tenemos en cuenta que en los últimos años tanto la energía nuclear como la eólica suponen cada una en torno al 20 % de la generación neta nacional de electricidad [2], una cuestión interesante es, por tanto, cómo de cerca estamos del mencionado punto de desencuentro. Esbozar una respuesta a esta pregunta es el objetivo del presente trabajo.

2. Planteamiento

Es muy difícil responder con rigor cuánta generación eólica puede integrarse en un sistema eléctrico. Uno de los motivos es la elevada complejidad de simular la gestión de las redes eléctricas. Esta gestión, entre otros problemas, aborda la cuestión de cuánta generación intermitente puede integrarse en cada momento, en función de la situación de la red por regiones y en base a unos margenes de seguridad preestablecidos. Por otra parte, la capacidad para integrar generación fluctuante varía mucho con la experiencia y con la tecnología disponible, de modo que hace poco más de una década una situación en la que la generación eólica superase instantáneamente el 10 % de la generación total se percibía como arriesgada. Hoy día, es habitual encontrar horas del año en que ese porcentaje supera el 60 %. Efectivamente, durante la primera década de los 2000 la energía eólica se ha desarrollado en España de manera espectacular. Actualmente nuestro país ostenta el quinto puesto a nivel mundial en cuanto a potencia eólica instalada y el segundo en Europa [3]. La figura 1 muestra la evolución de la potencia eólica en España desde 1998 hasta 2015.

El ejercicio que aquí se propone consiste en cuantificar la *energía eólica derrochada* como consecuencia del conflicto eólica/nuclear. Para ilustrar este concepto, la figura 2 muestra a la izquierda, a modo de ejemplo, el perfil real de generación del día 21 de Febrero de 2015, un día relativamente ventoso (la eólica proporcionó el 33,6 % de la generación total de ese día[2]). Se ha resaltado la parte correspondiente a la generación eólica (en verde) y a la nuclear (en lila). El área gris intermedia representa la generación correspondiente al resto de tecnologías, la mayoría de las cuales son regulables (ciclo combinado, hidráulica y carbón) y permiten el ajuste entre la rígida generación nuclear constante y las fluctuaciones de la eólica. Finalmente, la aparición de un área gris por debajo de cero puede deberse tanto a un balance negativo en las conexiones internacionales (exportamos más que importamos) como a un balance negativo en la generación hidroeléctrica (el consumo en bombeo supera la generación). En la misma figura a la derecha se muestra, para el mismo día, un perfil de eólica aumentado en un 75 % (que, en primera aproximación, podría resultar de tener un parque eólico un 75 % mayor). Se

[2] Ver http://www.ree.es/es/balance-diario/peninsula/2015/02/21

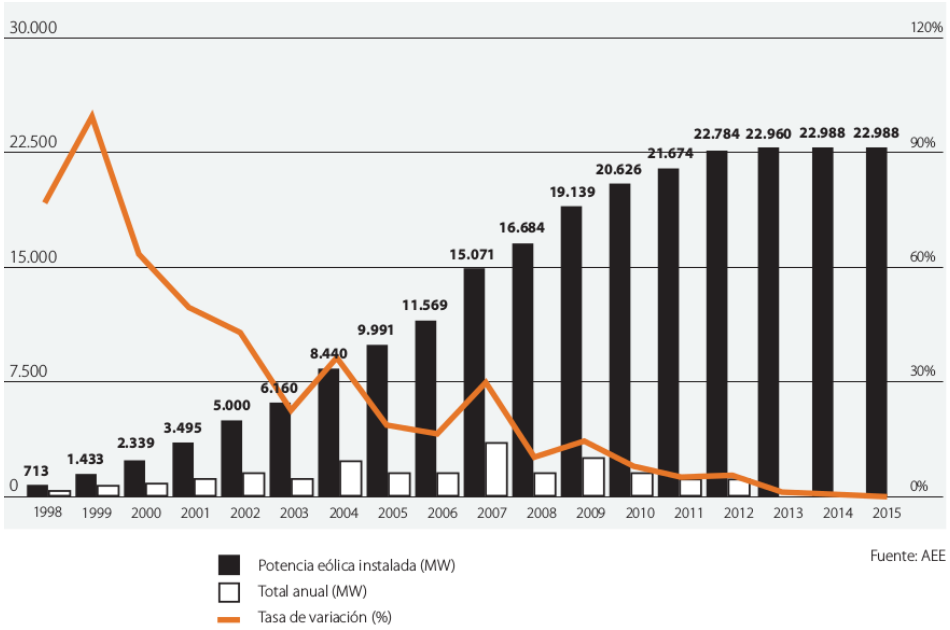

Figura 1: Evolución de la potencia eólica instalada anual, acumulada y porcentaje de variación en España en el periodo 1998-2015. Fuente: [4].

observa que el margen gris "de encaje" entre eólica y nuclear disminuye en todo el periodo, y que entre las 14h y las 19h aparece un solape debido a que la suma únicamente de nuclear y eólica superan la demanda observada en esas horas. Por tanto, y dado que, por motivos también tecnológicos, se prioriza la parada de parques eólicos a la de centrales nucleares, el área solapada es energía eólica que no llegaría a generarse, a pesar de la posibilidad de hacerlo. Esa área solapada la consideraremos *energía eólica derrochada* resultante del conflicto eólica/nuclear, dado que el viento es una forma particular de combustible, gratuito pero no almacenable.

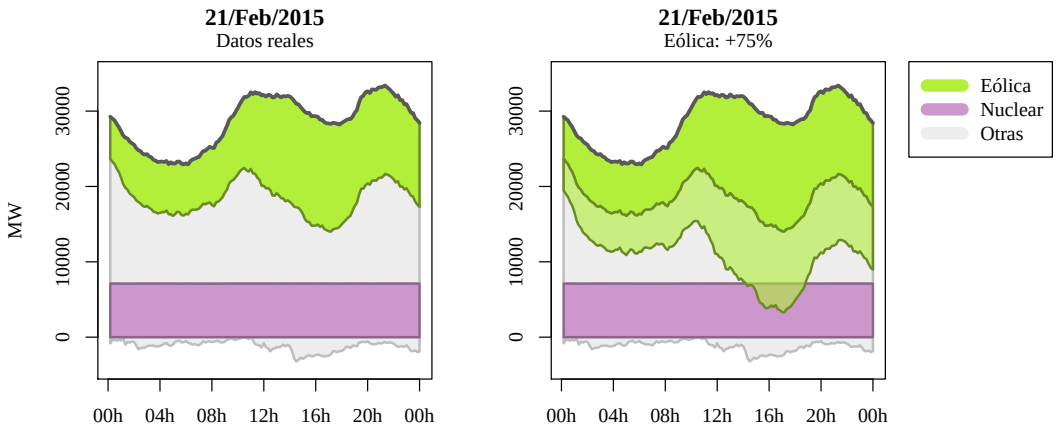

Figura 2: Simulación del conflicto eólica/nuclear al aumentar la generación eólica en un 75 %.

3. Metodología y definición de escenarios

Se han empleado datos de generación diezminutal procedentes de Red Eléctrica de España (REE) para estimar la cantidad anual de energía eólica derrochada anualmente, desde 2008 hasta 2015, bajo diferentes escenarios.

Con respecto a la generación eólica, se va a considerar un factor de escala k de 1 a 3. Este rango está en sintonía con el propuesto en [5] para la implantación de un mix 100 % renovable en España. Así, $k = 1{,}75$ representaría el escenario de la figura 2, donde se mostraba un aumento del 75 % de generación eólica. A la hora de interpretar los resultados, y tal y como se adelantaba en la sección anterior, asumiremos que multiplicar la serie temporal observada de generación eólica por el factor k es equivalente a haber multiplicado la potencia eólica instalada por el mismo factor.

Una cuestión importante tiene que ver con qué fuentes de generación *ceden espacio* a la generación eólica antes de empezar a considerarla como derrochada. La energía eólica derrochada no se obtiene simplemente de computar el área solapada de la anterior figura, ya que el sistema eléctrico cuenta con diferentes herramientas para reducir esa área, tales como aumentar las exportaciones haciendo un mayor uso uso de las conexiones internacionales o aumentar el consumo haciendo un mayor uso del bombeo. Se van a definir tres escenarios con estrategias diferentes para computar la energía eólica derrochada:

1. **Carbón-cero**: En este escenario, el *hueco* a la eólica se consigue solamente reduciendo la generación de ciclos combinados y centrales de carbón. Por tanto, se empieza a desperdiciar energía eólica cuando se alcanza:
   - Ciclo combinado = 0 MW
   - Carbón = 0 MW
2. **Isla-seca**: En este escenario se permite, además, la reducción de la generación hidroeléctrica y las importaciones hasta un valor nulo. Se empieza a desperdiciar energía eólica cuando se alcanza:
   - Ciclo combinado = 0 MW
   - Carbón = 0 MW
   - Hidroeléctrica = 0 MW[3]
   - Conexiones internacionales = 0 MW[4]
3. **Control-total**: En este escenario se hace uso de la capacidad máxima de bombeo y de las interconexiones internacionales antes de desperdiciar eólica. Se empieza a desperdiciar energía eólica cuando se alcanza:
   - Ciclo combinado = 0 MW
   - Carbón = 0 MW
   - Hidroeléctrica = Mínimo observado anual (valor máximo de bombeo observado)[5]

[3] En los periodos diezminutales donde esta variable es negativa (bombeo), se ha mantenido su valor negativo.

[4] En los periodos diezminutales donde esta variable es negativa (exportación), se ha mantenido su valor negativo.

[5] Se fija para cada año; oscila entre -2.134 MW (para 2010) y -3.509 MW (para 2012).

- Conexiones internacionales = Mínimo observado anual (valor máximo de exportación observado)[6]

Cabe mencionar que, si bien el escenario **Carbón-cero** es poco realista (ya que se asume que las interconexiones y la hidráulica permanecen invariables frente a situaciones de derroche eólico) y proporcionará una sobreestimación de la energía eólica derrochada, el escenario **Control-total** también lo es porque hace un uso indiscriminado tanto del bombeo (solamente limitado por la potencia instalada de bombeo, pero sin tener en cuenta la capacidad máxima de los embalses) como de las conexiones internacionales (sin tener en cuenta si el otro país aceptaría la energía, decisión que depende de la comparación de precios horarios en ambos países), de modo que este escenario proporcionará subestimaciones de la energía eólica derrochada. Así, los resultados para los tres escenarios descritos permitirán en realidad acotar, por arriba y por abajo, la energía eólica derrochada como resultado de la interacción eólica/nuclear.

4. Resultados

En la figura 3 se muestra, para cada año, la energía eólica derrochada en función de k y para cada uno de los tres escenarios descritos. A modo de referencia, señalamos que el eje de las ordenadas está escalado a 50.000 GWh, que es aproximadamente la generación eólica anual observada en los últimos años.

En estas gráficas se puede observar que el conflicto eólica/nuclear no existe en los primeros años analizados incluso para los casos de haber supuesto un parque eólico el triple de lo que entonces había (la potencia eólica instalada en 2008 era de 16,7 GW, ver figura 1). En los años siguientes el parque eólico español aumentó hasta los casi 23 GW instalados en 2013, representando el 22,3 % de la potencia instalada en el sistema eléctrico español peninsular [2].

Es importante mencionar que las curvas obtenidas siempre arrancan en valores nulos de energía eólica derrochada (para $k = 1$) porque partimos de los datos de generación reales de REE, sobre los que ya se han producido restricciones eventualmente. Por ejemplo, según la AEE, en 2014, las limitaciones a la producción eólica alcanzaron los 517 GWh (por interacción con la nuclear o por otros motivos) [6]. Por tanto, los valores mostrados en las gráficas serían cantidades adicionales debidas, bajo las hipótesis del estudio, a la interacción con la nuclear.

Finalmente, destacamos los resultados obtenidos para los años 2013, 2014 y 2015, ya que en ellos la potencia eólica instalada (también la nuclear) permanece constante. Por tanto, la variabilidad en los resultados refleja diferentes intensidades del conflicto eólica/nuclear para un mismo parque instalado. Estas diferentes intensidades del conflicto presumiblemente se deben al diferente recurso eólico disponible cada año, aunque también a variaciones en la generación nuclear. Efectivamente, el descenso de la energía eólica derrochada en 2015 con respecto a 2014 que refleja la figura 3 sucede en un año en que se observó un descenso notable de generación nuclear y eólica con respecto a 2014 (del -4,7 % y -5,9 %, respectivamente).

A partir de las simulaciones realizadas, es sencillo obtener también el porcentaje de tiempo que se está desperdiciando energía eólica. Este porcentaje se ha calculado como el ratio entre periodos de diez minutos en que se ha observado una situación de derroche de eólica y el número de periodos de diez minutos que tiene el año. Los resultados, para cada año y escenario en función de k, se muestran en la figura 4.

[6] Aumenta en valor absoluto cada año, desde -2.343 MW (en 2007) hasta su máximo de -4.534 MW (en

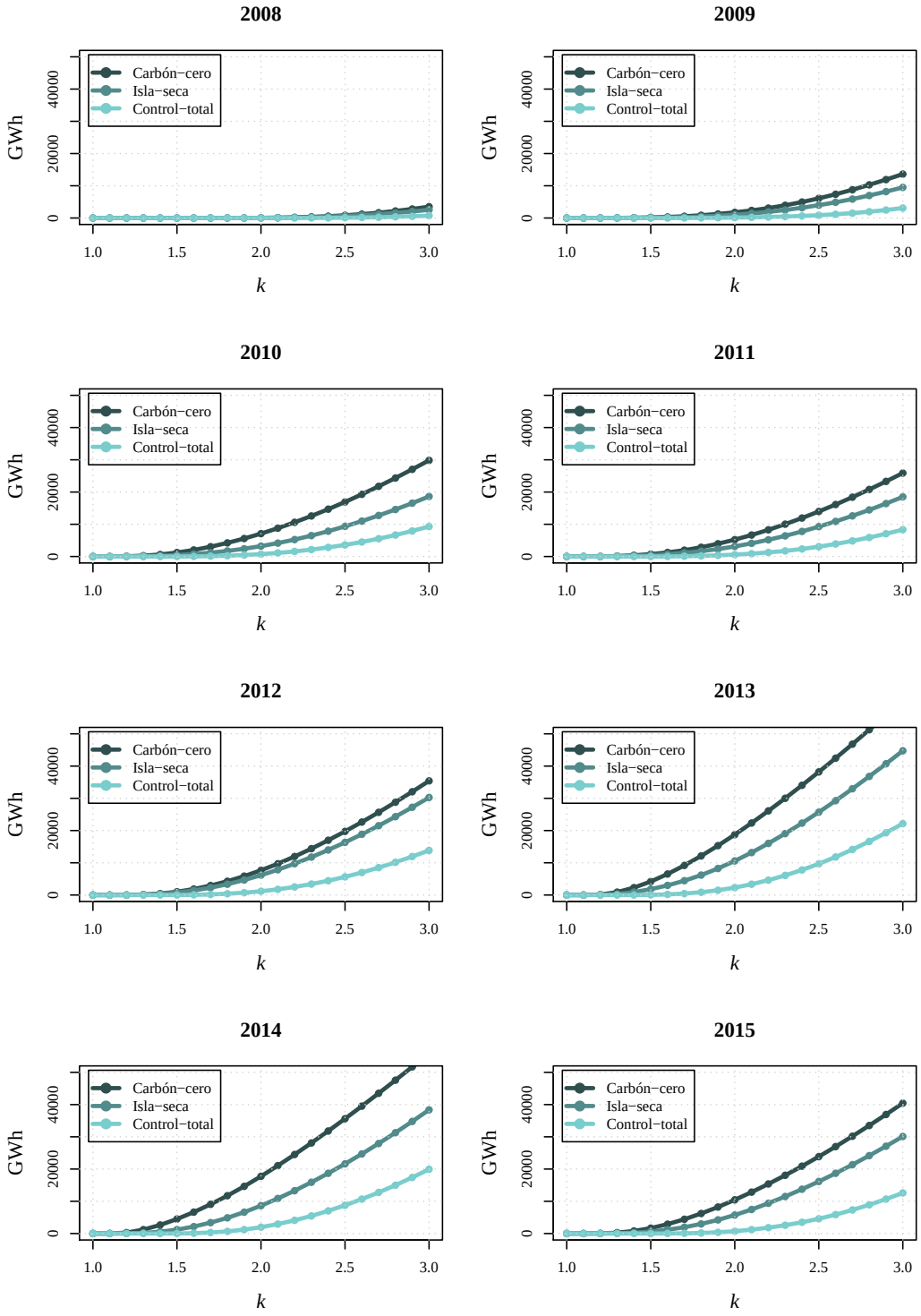

Figura 3: Energía eólica derrochada anual en función del factor de escala k y del escenario considerado.

2012). En 2013 y 2015 ronda los -4.000 MW.

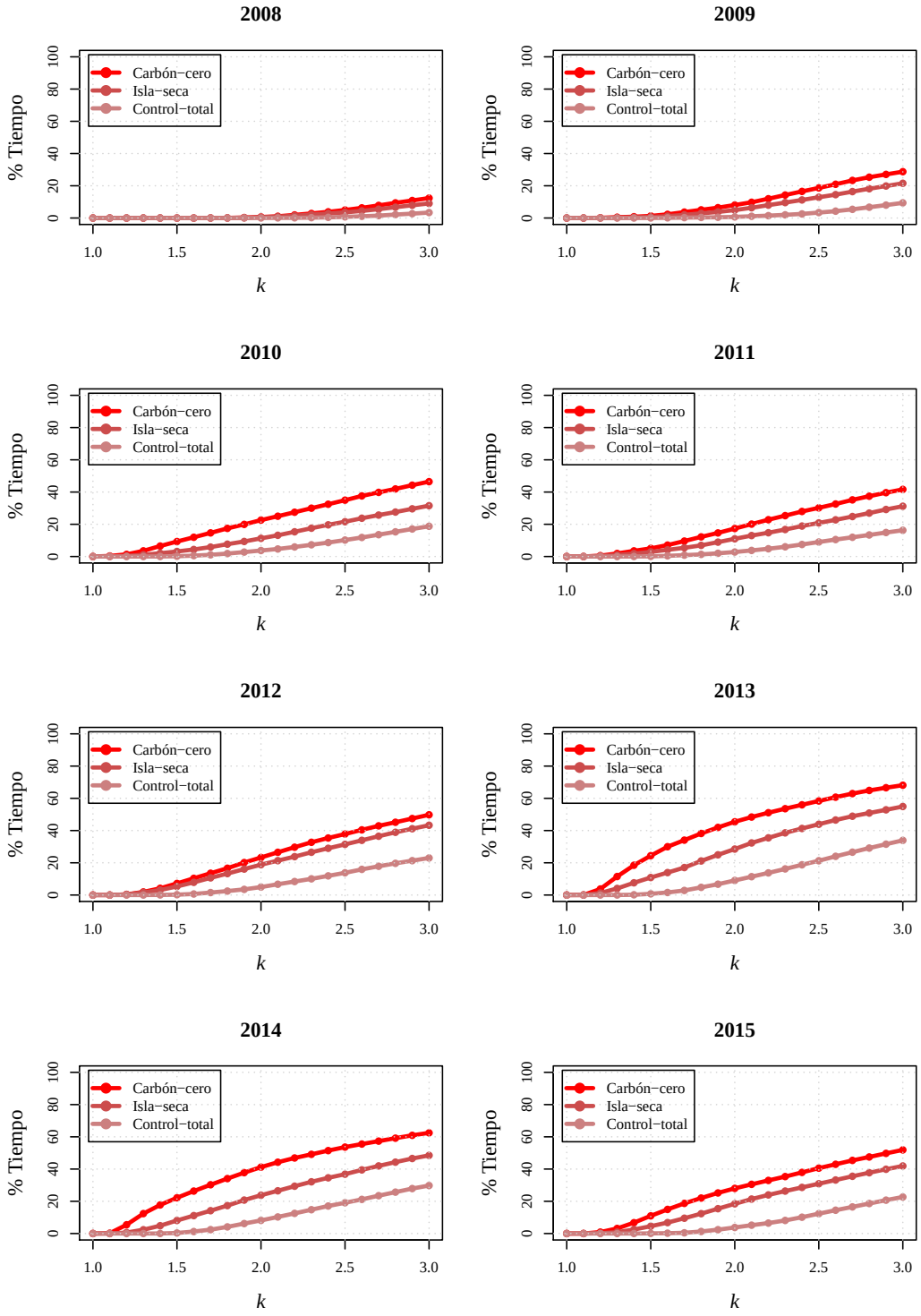

Figura 4: Porcentaje de tiempo en que se desperdicia energía eólica en función del factor de escala k y del escenario considerado.

5. Conclusiones

Los resultados obtenidos, y en especial, por ser los más recientes, las gráficas relativas a los últimos años, nos dan una idea de cómo de próximo se encuentra el conflicto tecnológico entre eólica y nuclear. Si bien no es inminente, parece probable que en una senda de aumento de la energía eólica instalada dicho conflicto no tarde en aparecer. Si nos fijamos en la gráfica para 2015 de la figura 3 vemos lo que podría ocurrir al aumentar la potencia eólica instalada actualmente en España, tomando el recurso eólico de este año como referencia. Si se duplica, el conflicto con la producción nuclear supondría una pérdida de entre 700 y 10.000 GWh. Si se triplica la potencia eólica instalada, la energía eólica malgastada anualmente estaría entre 12.000 y 40.000 GWh (recordamos que 50.000 GWh es la generación eólica anual típica de los últimos años; por tanto, el derroche sería descomunal). Obviamente se trata de una interacción gradual, en el sentido que, en ausencia de decisiones orientadas a aliviar el conflicto, la cantidad de energía derrochada aumentaría con la potencia eólica instalada. La cuestión a resolver sería, pues, cuánto estaríamos dispuestos a derrochar antes de abordar el conflicto.

De cara a cuantificar este derroche, las tablas 1 y 2 muestran la cantidad de energía eólica derrochada para el escenario intermedio **Isla-seca** y una estimación de su valor económico, obtenido a partir del valor medio anual del MWh en el mercado diario.[7] Si bien se puede argumentar que el hipotético aumento de eólica supondría un descenso del precio de mercado por el efecto *merit-order* [7], y por tanto del valor económico de la energía derrochada, también es cierto que las estrategias para minimizar el derroche (aumento de las exportaciones y aumento del bombeo) implican un aumento de la demanda y, por tanto, del precio del mercado diario. Ante estos dos efectos de signo contrario, asumimos el efecto neto es nulo y damos por aceptable el cómputo usando el precio medio observado del mercado diario.

Cuadro 1: Detalle de la energía eólica derrochada (en GWh) para el escenario **Isla-seca** en los años 2013-2015, y valor medio.

k	2013	2014	2015	Media
1,00	0	0	0	0
1,50	1.809	1.198	605	1.204
2,00	10.573	8.640	5.732	8.315
2,50	25.706	21.617	16.144	21.155
3,00	44.750	38.368	30.115	37.744

Cuadro 2: Detalle de la estimación del valor económico de la energía eólica derrochada (en millones de euros) para el escenario **Isla-seca** en los años 2013-2015, y valor medio.

k	2013	2014	2015	Media
1,00	0	0	0	0
1,50	80	50	30	54
2,00	468	364	288	373
2,50	1.138	911	812	954
3,00	1.981	1.616	1.515	1.704

[7] 2013: 44,26 Euros/MWh. 2014: 42,13 Euros/MWh. 2015: 50,32 Euros/MWh. Fuente: http://www.omie.es

Para acabar este estudio, y a modo de resumen, resaltamos los siguientes resultados concretos:

Si aumentamos en un 50 % el parque eólico, como consecuencia de su interacción con la nuclear, tendríamos episodios de derroche en torno al 8 % del tiempo, se malgastarían alrededor de 1.200 GWh eólicos al año (un 2.5 % de lo que se generó en 2015), lo que supondría unas pérdidas de unos 54 millones de euros.

Si duplicamos el parque eólico, como consecuencia de su interacción con la nuclear, tendríamos episodios de derroche en torno al 23 % del tiempo, se malgastarían alrededor de 8.300 GWh eólicos al año (un 17.4 % de lo que se generó en 2015), lo que supondría unas pérdidas de unos 373 millones de euros.

Referencias

[1] El Observatorio Crítico de la Energía. Hacia un sistema eléctrico 100 % renovable. El ejemplo de Francia y su extrapolación a España, 2015. Disponible en http://www.observatoriocriticodelaenergia.org.

[2] Red Eléctrica de España. El sistema eléctrico español, 2013. Disponible en http://www.ree.es.

[3] Global Wind Energy Council. Global Wind Report, 2015. Disponible en http://www.gwec.net.

[4] Asociación Empresarial Eólica. Eólica 2016. Disponible en http://www.aeeolica.org.

[5] Santiago Galbete Goyena. Viabilidad técnico-económica para un suministro eléctrico 100 % renovable en España, 2013. Universidad Pública de Navarra.

[6] Asociación Empresarial Eólica. Eólica 2015. Disponible en http://www.aeeolica.org.

[7] El Observatorio Crítico de la Energía. Primas para las energías renovables a coste cero para los consumidores, 2012. Disponible en http://www.observatoriocriticodelaenergia.org.