



Futuros escenarios de ahorro de emisiones de CO2 gracias a la energía eólica, solar fotovoltaica y solar termoeléctrica

Autor: Jorge Hernández Moro

Institución: Universidad Autónoma de Madrid

Otros autores: José Manuel Martínez Duart (Universidad Autónoma de Madrid)

Resumen

El calentamiento global de origen antropogénico es causado en gran medida por la gran cantidad de emisiones de CO₂ producidas en la quema de combustibles fósiles. Las energías renovables, entre las que se encuentran las tecnologías solares (fotovoltaica y termoeléctrica) y eólica, pueden ayudar a reducir las emisiones de CO₂ asociadas a la producción de energía eléctrica. El objetivo es mitigar el cambio climático y limitar el aumento de las temperaturas a unos 2°C de media. Para cumplir dicho objetivo es necesaria una reducción drástica en el ritmo de emisiones anuales de CO₂, de modo que se consiguiera estabilizar la concentración atmosférica de este gas en unas 450 partes por millón.

En este trabajo hacemos un estudio de la situación pasada y presente de las tecnologías solar fotovoltaica, solar termoeléctrica y eólica. También realizaremos proyecciones de futuro para la potencia instalada acumulada y la electricidad producida entre 2012 y 2050 basándonos en los escenarios de la Agencia Internacional de la Energía. Con estas proyecciones podremos estimar los ahorros en términos de emisiones de CO₂ que se producirán gracias a la instalación futura de estas tecnologías. Para ello antes es necesario considerar las emisiones asociadas a estas tecnologías renovables, que aunque no producen emisiones in situ, sí que tienen asociadas unas emisiones relativamente bajas debido a su fabricación, instalación y mantenimiento.

Palabras claves: Emisiones CO₂, Energía solar; Energía eólica

Introducción

El sistema energético actual, basado principalmente en el consumo de combustibles fósiles, resulta insostenible a largo plazo. Es por esto que se debe de caminar hacia un nuevo modelo energético que sea medioambientalmente sostenible, que garantice el suministro futuro y el crecimiento económico. Esta transición debe de estar liderada por las energías renovables, entre las cuales destacan la solar fotovoltaica (PV), la solar termoeléctrica (CSP) y la eólica, que son las que estudiaremos en este trabajo. Los aspectos económicos tienen una gran importancia, más aún en un estado de crisis económica como el actual, por lo que ya hemos analizado recientemente la evolución futura de los costes para la solar CSP [1] y la estamos estudiando también para la solar PV y eólica.

En términos medioambientales, que es lo que trataremos en este trabajo, estas tecnologías justifican su implantación debido a que prácticamente no generan emisiones de CO₂, lo que las convierte en un instrumento de gran importancia a la hora de luchar contra el calentamiento global de origen antropogénico. El objetivo más viable que se plantea la comunidad internacional, representada por la Agencia Internacional de la Energía (IEA), es conseguir estabilizar la concentración de CO₂ en la atmósfera en unas 450 partes por millón, lo que conseguiría limitar el incremento de temperatura a tan solo 2°C de media en todo el planeta. El escenario que acomete dichos objetivos es el escenario BLUE de la IEA publicado por primera vez en la publicación “Energy Technology Perspectives” de 2008 [2]. Dicho escenario conlleva una reducción de emisiones tal que en 2050 las emisiones anuales de CO₂ serían el 50% de las emisiones correspondientes al año 2005. Esto supone un gran desafío que requeriría un rápido cambio de dirección respecto de la tendencia actual, de modo que las emisiones alcanzarían su máximo durante esta misma década. Respecto a las tecnologías renovables el escenario BLUE pronostica que la aportación de estas tecnologías al mix eléctrico global será del 46% en 2050. La aportación al mix eléctrico de las tecnologías que aquí estudiamos sería del 12%, el 6% y el 5% para la energía eólica, solar PV y solar CSP respectivamente, por lo que entre las tres tecnologías aportarían un 23% de la electricidad global en 2050.

En este trabajo estudiaremos cual será el ahorro de emisiones de CO₂, entre 2012 y 2050, debido a la instalación de sistemas solar PV, solar CSP y eólicos según el escenario BLUE de la IEA. Para ello necesitaremos primero conocer cuál es la proyección futura de producción de electricidad para estas tecnologías y también cuales son las emisiones reales (incluyendo fabricación, transporte e instalación, O&M, etc.) de estas tecnologías renovables y también la de las tecnologías convencionales a las que supuestamente sustituirían.

Pasado y presente de las tecnologías solar PV, solar CSP y eólica

Las tecnologías solar PV, solar CSP y eólica han tenido un desarrollo espectacular durante las últimas dos décadas, principalmente gracias al apoyo por parte de los estados a estas tecnologías mediante programas de primas a la generación. Éste es especialmente el caso de la solar PV, que ha crecido de un modo continuo y sostenido en el tiempo a un ritmo medio de un 40% anual durante la última década [3]. Dicho ritmo de

crecimiento se ha acelerado durante los últimos cinco años, alcanzando valores medios del 60%, de modo que la potencia instalada acumulada durante ese periodo de tiempo se ha multiplicado por diez hasta alcanzar los 70 GW a principios de 2012 [4].

Este no ha sido el caso de la tecnología solar CSP, cuyo crecimiento no ha gozado de continuidad en el tiempo, ya que entre la primera instalación de sistemas en Estados Unidos en la década de los ochenta y 2005 no se instaló ningún sistema comercial [2]. Sin embargo, desde 2005 se ha visto el resurgir de esta tecnología, habiéndose quintuplicado la potencia instalada acumulada de esta tecnología durante los últimos siete años hasta alcanzar un valor total de 1.76 GW a comienzos de 2012 [4,5].

La tecnología eólica es otro ejemplo, como la solar PV, de crecimiento continuo y sostenido en el tiempo, habiéndose multiplicado en la actualidad su potencia instalada unas cien veces respecto de su valor en 1990. Desde 2001 ha crecido a un ritmo anual de entre el 20% y el 30% [2] hasta alcanzar un potencia instalada acumulada de 238 GW [4] a comienzos de 2012, lo que supone una cantidad mayor que tres veces la potencia instalada de las dos tecnologías solares juntas.

En la Fig. 1 se ha representado la evolución pasada, entre 1990 y 2012, de la potencia instalada acumulada para las tecnologías solar PV [3,4,6-8], solar CSP [4,5,9-11] y eólica [2,4,12]. La representación se ha hecho en escala logarítmica, para poder comparar las tres tecnologías en una misma gráfica, ya que si no la eólica eclipsaría a las otras dos, especialmente a la solar CSP.

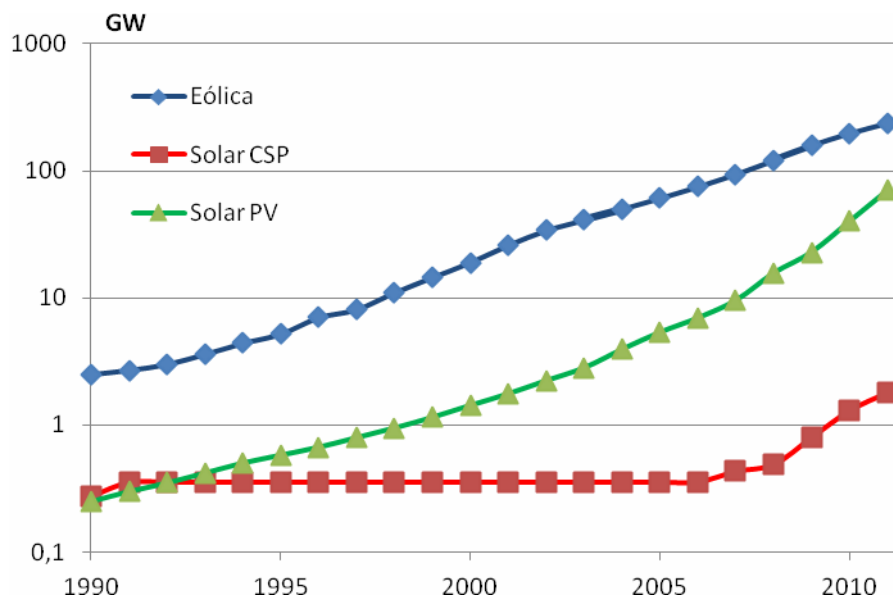


Fig. 1. Potencia instalada acumulada entre 1990 y principios de 2012, representada en escala logarítmica, para las tecnologías solar PV, solar CSP y eólica.

Escenarios futuros para las tecnologías solar PV, solar CSP y eólica

Los objetivos del escenario BLUE de la IEA, en términos de potencia instalada acumulada, para 2030 y 2050 para nuestras tres tecnologías renovables han sido resumidos en la Tabla I que se muestra a continuación [2,3,12,13]. En dicha tabla también se incluye el valor actual de la potencia instalada para cada una de las tres tecnologías [4,5]. En conveniente puntualizar que las cifras dadas para la eólica incluyen tanto la eólica on-shore como la off-shore.

Tabla I. Potencia instalada acumulada (en GW) actual (a comienzos de 2012) y la proyectada en 2030 y 2050 para el escenario BLUE de la IEA para las tecnologías solar PV, solar CSP y eólica.

Tecnología	2012	2030	2050
Solar PV (GW)	70	150	1150
Solar CSP (GW)	1.76	250	630
Eólica (GW)	238	1024	2010

La tecnología solar PV, como puede observarse en la Tabla I, pasaría de unos 70 GW de potencia instalada actualmente a 150 GW en 2030 y 1150 GW en 2050. Esto supondría que el crecimiento que tendría esta tecnología hasta 2030 sería relativamente pequeño, pues solamente doblaría su potencia actual. Sin embargo, entre 2030 y 2050 esta tecnología experimentaría un crecimiento espectacular debido principalmente al despegue de las láminas delgadas y los dispositivos de tercera generación, que abaratarán considerablemente los costes, logrando multiplicar por 16 la potencia instalada actual.

La tecnología que experimentaría un mayor crecimiento relativo es con gran diferencia la solar CSP, que pasaría de unos 1.76 GW en la actualidad a 250 GW en 2030 y 630 GW en 2050. Esto supone que la capacidad instalada acumulada se multiplicaría unas 140 veces en 2030 y unas 360 veces en 2050 respecto de su valor actual. Es por esto que esta tecnología tendrá que hacer un gran esfuerzo para poder cumplir con los objetivos pronosticados en el escenario BLUE, especialmente hasta 2030, cuando se supone que superará a la solar PV durante un tiempo.

Respecto a la energía eólica, a pesar de tener los mayores objetivos de potencia instalada en términos absolutos es la tecnología que probablemente con mayor facilidad podrá cumplirlos. Esto es debido a su madurez tecnológica, su nada despreciable potencia instalada actual y a la gran industria que tiene tras de sí. Su potencia instalada pasaría de los 238 GW actuales a 1024 GW en 2030 y a 2010 GW en 2050. Esto supondría que su potencia instalada se multiplicaría por 4 y por 8 en 2030 y 2050 respectivamente respecto de su valor actual, lo que parece un objetivo plenamente abordable.

Cuando se fija un objetivo a 2050 este puede ser alcanzado de muchas formas distintas, con un crecimiento lineal, exponencial, potencial, polinómico o en forma de curva S, es decir, llegando a un punto de saturación. Sin embargo la existencia de objetivos

intermedios supone una ligadura importante a la hora de proyectar una posible ecuación para la potencia instalada acumulada futura (2012-2050). En el caso del escenario BLUE dichos objetivos intermedios solo nos vienen dados para el año 2030, como puede observarse en la Tabla I. Según los valores expuestos en dicha tabla para potencia instalada acumulada actual (2012) y los valores esperados en 2030 y 2050 hemos estimado que la ecuación que mejor se ajusta a dichos objetivos es la logística, es decir, la curva con forma de S. Dicha curva está caracterizada por la siguiente ecuación [14]:

$$Q(t) = \frac{e^{r(t-2012)}}{(1/Q(0)) - (1/M) + (e^{r(t-2012)})/M} \quad (1)$$

donde Q(t) es la potencia instalada acumulada en un determinado año “t” entre 2012 y 2050, Q(0) es el valor de dicha potencia en el momento inicial, es decir en 2012 (ver Tabla I), “M” es la potencia instalada acumulada máxima y “r” el parámetro de crecimiento. El resumen de la estimación que hemos realizado para los distintos parámetros de las ecuaciones para cada una de las tecnologías ha sido expuesto en la Tabla II y también representado gráficamente en la Fig. 2. Destacar que el valor tan alto dado para M para la solar PV en la Tabla 2 no implica que vaya a alcanzarse esta potencia, sino que es el valor que nos permitía obtener la ecuación que mejor se adaptaba a los objetivos entre 2012 y 2050. Cabe destacar en la Fig. 2 lo bien que encajan las representación de las ecuaciones estimadas para cada tecnología con los objetivos del escenario BLUE en 2030 y 2050.

Tabla II. Ecuación que mejor se ajusta a los objetivos de potencia instalada acumulada del escenario BLUE Map de la IEA (resumidos en la Tabla I) para las tecnologías solar PV, solar CSP y eólica.

Tecnología	Parámetros		
Solar PV	Q(0)= 70 GW;	M= 2*10 ⁷ GW;	r=0.073
Solar CSP	Q(0)= 1.76 GW;	M= 630 GW;	r=0.3
Eólica	Q(0)= 238 GW;	M= 2250 GW;	r=0.11

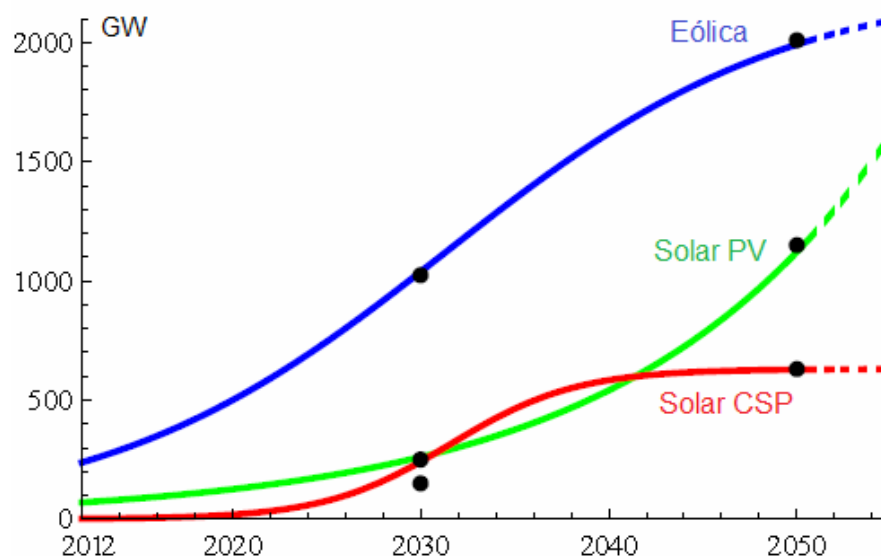


Fig. 2. Estimación propia de la capacidad instalada acumulada futura para las tecnologías solar PV, solar CSP y eólica para el escenario BLUE de la IEA entre 2012 y 2050 (ver Tabla II) a partir de los objetivos de este escenario para 2030 y 2050 (ver Tabla I).

Conocer la potencia instalada acumulada futura es algo muy interesante, pero si lo que queremos es saber cuánto CO₂ se ahorrará gracias a la instalación de estas tecnologías, los valores que debemos de conocer no son los de la potencia, sino los de la electricidad producida.

Los valores actuales (año 2012) de la electricidad producida anualmente mediante las tecnologías solar PV, solar CSP y eólica no están todavía disponibles. Este inconveniente lo hemos solventado estimando dicha producción anual de electricidad mediante la extrapolación la electricidad producida por MW instalado de algún año anterior cercano a la potencia a la potencia instalada acumulada en 2012 (ver Tabla I) que sí que es conocida.

De este modo para la tecnología solar PV se ha estimado que en 2012 se producirán aproximadamente 111 TWh/año mediante la extrapolación la potencia instalada y la electricidad producida durante el año 2009 [4,15]. Respecto a la previsión para los años 2030 y 2050 el escenario BLUE pronostica una producción de 312 y 2584 TWh/año respectivamente para esta tecnología [2].

Para CSP hemos realizado también una estimación de la electricidad que se producirá durante 2012 extrapolando la electricidad producida en 2009 [15] por MW instalado [4]. De este modo, hemos estimado que se producirán unos 4.2 TWh/año en 2012. La previsión para los años 2030 y 2050 del escenario BLUE de la IEA es que se produzcan unos 1000 y 2200 TWh/año respectivamente para esta tecnología [13]. Respecto a la solar CSP cabe destacar que se produce una mayor cantidad de electricidad por cada MW instalado que lo que se produce para la solar PV. Las causas de esto son principalmente dos. Primero los sistemas de almacenamiento de la solar CSP, que le permite producir a máxima potencia durante más horas al día. Segundo, que las plantas

CSP son sólo instaladas en lugares con un gran recurso solar, a diferencia de la solar PV que gracias a que utiliza tanto la radiación directa como la difusa se pueden instalar en lugares más desfavorables, como por ejemplo Alemania.

Por último, para la energía eólica hemos estimado el valor de la producción de electricidad en 2012 mediante los datos de potencia instalada acumulada y electricidad producida en 2006 [2]. De este modo, y utilizando la potencia instalada actual [4] hemos estimado que se producirán 453 TWh/año durante el año 2012 gracias a esta tecnología. Las estimaciones para el año 2030 y 2050 para esta tecnología son de una producción de 2663 y 5174 TWh/año respectivamente para el escenario BLUE [2]

Todos estos datos han sido resumidos en la Tabla III, donde se dan los valores actuales y las predicciones en 2030 y 2050 para el escenario BLUE para la producción de electricidad a partir de las tecnologías solar PV, solar CSP y eólica. Todas estas cifras se traducirían en 2050, como ya hemos dicho anteriormente, en una producción de la electricidad global del 6%, 5% y 12% para la solar PV, solar CSP y eólica respectivamente [2], lo que entre las tres suma un total del 23% de la electricidad global en 2050.

Tabla III. Electricidad producida (en TWh/año) actual (a comienzos de 2012) y la proyectada en 2030 y 2050 para el escenario BLUE de la IEA para las tecnologías solar PV, solar CSP y eólica (ver texto).

Tecnología	2012	2030	2050
Solar PV (TWh/año)	111	312	2584
Solar CSP (TWh/año)	4.2	1000	2200
Eólica (TWh/año)	453	2663	5174

Para asignar una ecuación analítica a la evolución futura (2012-2050) de la producción de electricidad mediante las tecnologías solar PV, solar CSP y eólica haremos igual que hicimos para el caso de la potencia instalada acumulada. De este modo, la función que mejor se ajusta a los objetivos, como puede observarse en la Fig. 3, es la función logística, por lo que la electricidad producida en un año t entre 2012 y 2050, E(t), vendría dada por:

$$E(t) = \frac{e^{r(t-2012)}}{(1/E(0)) - (1/M) + (e^{r(t-2012)}/M)} \quad (2)$$

donde E(0) es la electricidad producida en el momento inicial (en 2012), M la electricidad máxima y r el parámetro de crecimiento. En la Tabla IV se han resumido los valores de los parámetros de la Ec. (2) para las funciones que dan la electricidad producida futura que mejor se ajusta a los objetivos del escenario BLUE de la IEA. La representación gráfica de las ecuaciones resumidas en la Tabla IV han sido representadas en la Fig. 3, donde además se han representado los objetivos para los años 2030 y 2050 para poder así visualizar como se adaptan nuestras curvas a dichos objetivos.

Tabla IV. Ecuación que mejor se ajusta a los objetivos de electricidad producida del escenario BLUE de la IEA (resumidos en la Tabla III) para las tecnologías solar PV, solar CSP y eólica.

Tecnología	Parámetros		
Solar PV	$E(0)= 111 \text{ TWh/año};$	$M= 2 \cdot 10^5 \text{ TWh/año}$	$r=0.082$
Solar CSP	$E(0)= 4.2 \text{ TWh/año};$	$M= 2200 \text{ TWh/año};$	$r=0.33$
Eólica	$E(0)= 453 \text{ TWh/año};$	$M= 5600 \text{ TWh/año};$	$r=0.13$

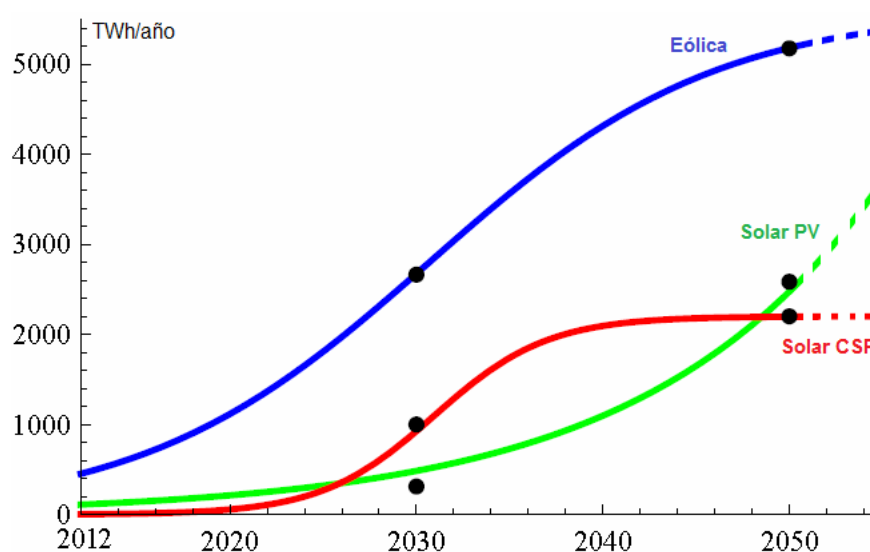


Fig. 3. Estimación propia de la electricidad futura producida anualmente para las tecnologías solar PV, solar CSP y eólica para el escenario BLUE de la IEA entre 2012 y 2050 (ver Tabla IV) a partir de los objetivos de este escenario para 2030 y 2050 (ver Tabla III).

Emisiones de CO₂ evitadas hasta 2050 gracias a la instalación de sistemas solares PV, solares CSP y eólicos.

Aunque las tecnologías solar PV, solar CSP y eólica, son tecnologías renovables de generación de electricidad y no emiten a priori CO₂ in situ, en realidad llevan asociadas unas determinadas emisiones de CO₂. Dichas emisiones son debidas principalmente a su fabricación, transporte, instalación y operación y mantenimiento. Conocer el valor de dichas emisiones y su evolución futura es fundamental para poder calcular los ahorros de CO₂ que se producen gracias a la instalación de estas tecnologías.

Para poder asignar una ecuación analítica a la cantidad de emisiones que ahorran nuestras tecnologías renovables por kWh producido hemos tenido en cuenta dos consideraciones. La primera es la que las emisiones asociadas a cada tecnología disminuirán de un modo lineal desde su valor actual hasta su valor esperado en 2050. La

segunda es que dado el estado del mix eléctrico actual y las proyecciones de futuro que existen, se ha considerado que estas tecnologías renovables sustituirían a un mix formado al 50% por carbón y gas natural, cuyas emisiones también disminuyen de forma lineal entre 2012 y 2050 gracias al desarrollo de estas tecnologías. Lo que estamos diciendo no es que el mix eléctrico sea 50% carbón y 50% gas natural, sino que serán a estas dos tecnologías las que sustituyan nuestras tecnologías renovables. Hemos tomado el carbón y el gas natural porque son las dos principales fuentes contaminantes del mix eléctrico y se ha considerado que la nuclear permanecerá constante en términos absolutos, aunque irá disminuyendo lentamente su importancia en términos relativos. Además la energía nuclear lleva asociadas unas emisiones de CO₂ muy bajas, pues no emiten gases de efecto invernadero in situ.

Para la tecnología solar PV se han considerado que las emisiones actuales serían de unos 33 gCO₂/kWh, correspondientes a la tecnología de silicio cristalino, y que estas disminuirán hasta los 8.2 gCO₂/kWh, correspondientes al silicio en lámina delgada [16]. Para la tecnología solar CSP se ha considerado actualmente unas emisiones considerablemente mayores, de 137 gCO₂/kWh de media [17], debido a la hibridación con gas natural, que en países como España representa hasta el 15% de la producción total de estas plantas. Dicha hibridación permite abaratar los costes de la electricidad y junto al almacenamiento térmico mejorar la seguridad de suministro, lo que le aporta a esta tecnología un plus sobre el resto de renovables dependientes del tiempo atmosférico. Sin embargo, y a pesar de que tomaremos como referencia actualmente las plantas con respaldo de gas natural, las plantas CSP actuales que son completamente solares tienen de media unas emisiones de tan solo 16gCO₂/kWh [17]. Para el año 2050 se espera que las plantas sean completamente solares y que la seguridad de suministro venga dada por el almacenamiento térmico, de modo que las emisiones disminuirían de media a los 8.5 gCO₂/kWh [17]. Respecto a la tecnología eólica las emisiones actuales son de unos 13 gCO₂/kWh y se espera que disminuyan hasta unos niveles tan bajo como son los 4 gCO₂/kWh en 2050 [16].

Como hemos dicho anteriormente, hemos supuesto que las tecnologías solar PV, solar CSP y eólica evitarían la construcción de nuevas plantas de carbón y gas natural. Es decir, que no es realmente sustituir, sino que la nueva potencia instalada, porque la demanda de electricidad seguirá aumentando, será ocupada en vez de con gas y carbón con las renovables que estamos tratando.

La producción de electricidad mediante carbón tiene actualmente asociadas unas emisiones que van desde los 800gCO₂/kWh hasta los 1000 gCO₂/kWh [16,18] por lo que hemos consideraremos actualmente unos 900 gCO₂/kWh que deberían de reducirse hasta los 630 gCO₂/kWh en 2050 [16]. Sin en vez de con carbón la electricidad se generara mediante gas natural varía actualmente entre los 400 y los 500 gCO₂/kWh [16,18], por lo que tomaremos un valor medio de 450 gCO₂/kWh. Se espera que dicho valor se reduzca hasta los 350 gCO₂/kWh en 2050 [16].

En la Tabla V se han resumido todos los valores anteriormente expuestos sobre las emisiones actuales y las proyecciones a 2050 asociadas a las tecnologías solar PV, solar CSP, eólica, térmica de carbón y ciclo combinado de gas natural. Además, en una última columna de esa misma tabla se han resumido la ecuación de la recta que describe, para cada tecnología, las emisiones asociadas por kWh producido, $y(t)$, para un año "t" entre

2012 y 2050. La representación gráfica de los datos y ecuaciones contenidos en la Tabla V ha sido realizada en la Fig. 4.

Tabla V. Emisiones asociadas a cada una de las tecnologías en 2012 y 2050, en unidades de gCO₂/kWh, y ecuación asociada a cada tecnología para dichas emisiones.

Tecnología	2012	2050	Ecuación asociada
Solar PV (gCO ₂ /kWh)	33	8.2	$y_1(t) = -0.6526t + 1346.1$
Solar CSP (gCO ₂ /kWh)	137	8.5	$y_2(t) = -3.3816t + 6940.7$
Eólica (gCO ₂ /kWh)	13	4	$y_3(t) = -0.2368t + 489.53$
Carbón (gCO ₂ /kWh)	900	630	$y_4(t) = -7.1053t + 15196$
Gas Natural (gCO ₂ /kWh)	450	350	$y_5(t) = -2.6316t + 5744.7$

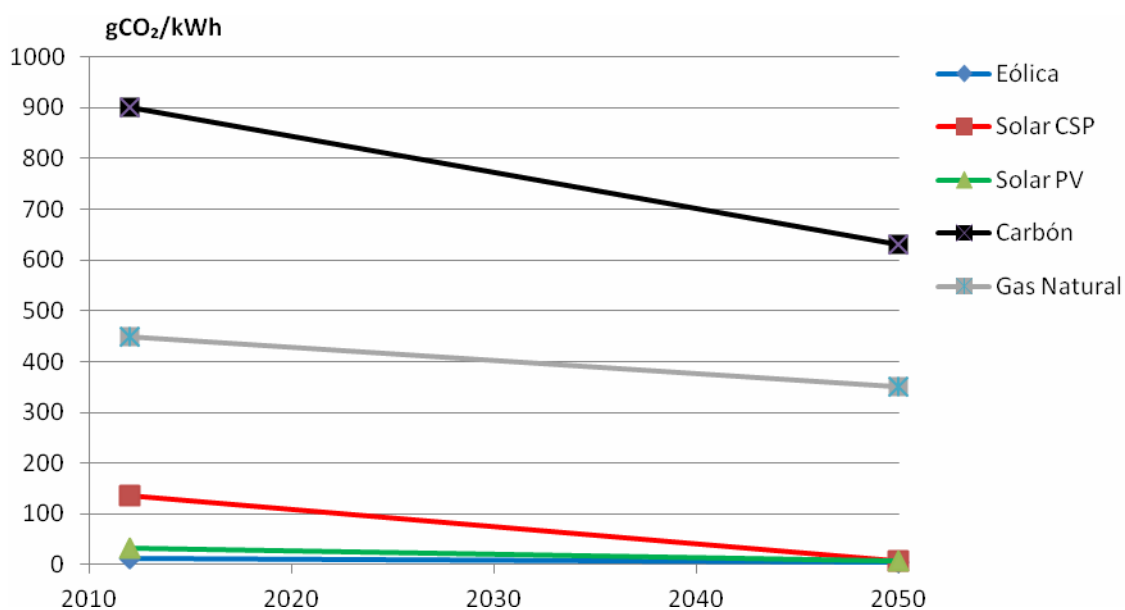


Fig. 4. Valor actual y estimación hasta 2050 de las emisiones de CO₂ debidas a la producción de electricidad a partir de las tecnologías eólica, solar PV, solar CSP, carbón y gas natural (ver Tabla V).

Para calcular los ahorros de emisiones de CO₂ que se producirán en el escenario BLUE de la IEA gracias a la instalación de las tecnologías solar PV, solar CSP y eólica entre 2012 y 2050 se necesita por un lado conocer las ecuaciones que dan para cada tecnología en el ese intervalo de tiempo el ahorro de CO₂ por kWh producido, y por otro lado la proyección de la electricidad que se produciría con estas tecnologías. La segunda ya las conocemos y están resumidas en la Tabla IV y Fig. 3. La primera, es decir, los ahorros de CO₂ de cada tecnología por cada kWh producido, están resumidas en la Tabla VI que se expone a continuación. En dicha tabla se observa como los ahorros de CO₂

para cada tecnología renovable en un determinado año t , $f(t)$, es igual a la media de las ecuaciones correspondientes a las emisiones del gas natural y el carbón menos la ecuación correspondiente a nuestra tecnología renovable en cuestión (ver Tabla V).

Tabla VI. Ecuaciones que dan los ahorros de emisiones de CO₂ por kWh producido, en gCO₂/kWh, entre 2012 y 2050 para las tecnologías solar PV, solar CSP y eólica.

Tecnología	Ahorro de emisiones de CO ₂ (gCO ₂ /kWh)
Solar PV	$f_1(t) = (y_4(t) + y_5(t)) / 2 - y_1(t) = -4.21585t + 9124.25$
Solar CSP	$f_2(t) = (y_4(t) + y_5(t)) / 2 - y_2(t) = -1.48685t + 3529.65$
Eólica	$f_3(t) = (y_4(t) + y_5(t)) / 2 - y_3(t) = -4.63165t + 9980.82$

Ahora ya estamos en disposición de calcular la función que nos dé el ahorro de emisiones anuales para cada tecnología entre 2012 y 2050 gracias al cumplimiento del escenario BLUE de la IEA. Dicha función será igual al producto de la función que representa el ahorro de CO₂ por kWh producido, $f(t)$ (ver Tabla VI), por la electricidad producida anualmente por cada una de las tecnologías en el escenario BLUE, $E(t)$ (ver Tabla IV). Dado que la primera función está en unidades de gCO₂/kWh y la segunda lo está en TWh/año, el resultado, tras los convenientes cambios de unidades, vendrá dado en GTon CO₂/año. Es decir para un año t entre 2012 y 2050:

$$\text{Ahorro de CO}_2 \text{ al año } (t) = f(t) \cdot E(t) \quad (3)$$

La Fig. 5 representa la evolución futura del ahorro de emisiones anuales producido por las tecnologías solar PV, solar CSP y eólica. Pero si queremos conocer el valor total de la cantidad de CO₂ que se ha ahorrado en el intervalo de tiempo 2012-2050 tendremos que calcular el área debajo de cada una de las curvas, o lo que es lo mismo calcular la integral definida entre 2012 y 2050 de las funciones representadas. De este modo,

$$\text{Ahorro de CO}_2 \text{ total} = \int_{2012}^{2050} f(t) \cdot E(t) \cdot dt \quad (4)$$

Dichos ahorros de emisiones de CO₂ han sido calculados y se presentan resumidos en la Tabla VII en unidades de GTon de CO₂

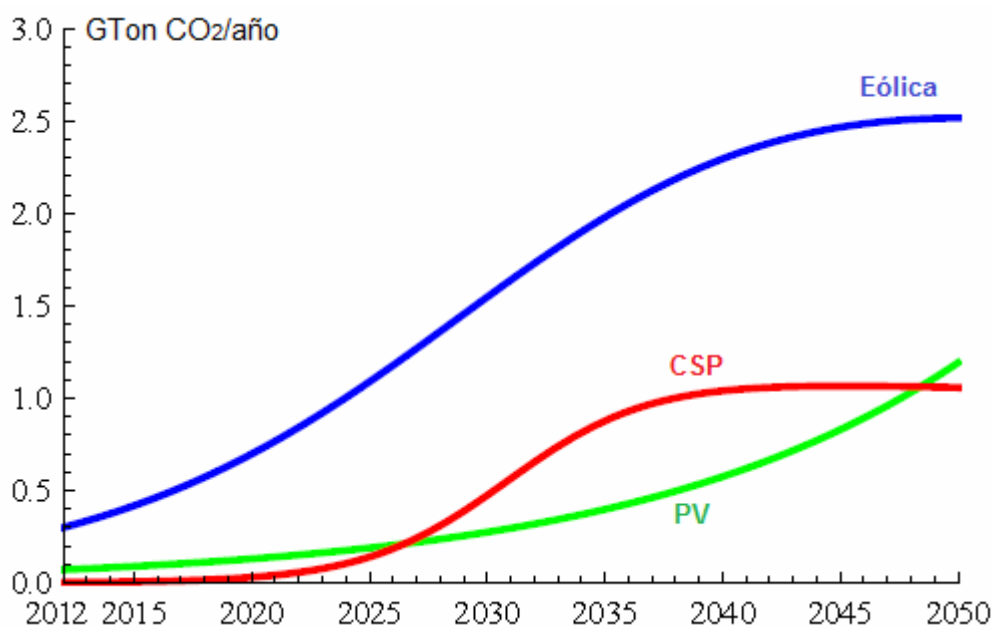


Fig. 5. Ahorro de emisiones de CO₂, en GTon CO₂/año, debido a la instalación de sistemas solares PV, solares CSP y eólicos de acuerdo al escenario BLUE de la IEA.

Tabla VII. Emisiones totales ahorradas entre 2012 y 2050, en GTon de CO₂, para las tecnologías solar PV, solar CSP y eólica si se cumpliera el escenario BLUE de la IEA para la instalación futura de este tipo de sistemas.

Tecnología	Emisiones ahorradas (GTon CO ₂)
Solar PV	15.25
Solar CSP	20.81
Eólica	58.87
Total	94.93

Conclusiones

-La contribución de las tecnologías solar PV, solar CSP y eólica a los ahorros de emisiones que lleva asociado el cumplimiento del escenario BLUE de la IEA entre 2012 y 2050 son de unas 15.25, 20.81 y 58.87 GTon de CO₂ respectivamente. Esto supone que estas tres tecnologías contribuirían a mitigar el cambio climático evitando emitir un total de casi 95 GTon de CO₂.

-Es importante destacar la importancia no solamente de los objetivos finales de la instalación de este tipo de tecnologías renovables, sino también de cómo se consiguen dicho objetivos. Es decir, que no importa tanto la meta, sino el camino. De este modo la tecnología solar CSP, que en 2050 ahorra menos CO₂ al año que la solar PV sin embargo, en el intervalo de tiempo 2012-2050, habrá ahorrado un 34% más que esta última. Esto es debido a que la potencia instalada CSP se pronostica que se instalará

principalmente entre 2020 y 2040, mientras que la solar PV lo haría principalmente entre 2030 y 2050.

-Se ha demostrado que son fundamentales las inversiones actuales en estas tecnologías, pues si retrasamos su instalación, el incremento de la temperatura atmosférica será superior e irreversible, dada la inercia que arrastra la concentración atmosférica de CO₂ respecto del ritmo de emisiones.

Referencias:

- [1] J. Hernández-Moro y J.M. Martínez-Duart. Energy Policy 41, 184-192 (2012).
- [2] International Energy Agency (IEA). Energy technology perspectives 2008: scenarios and strategies to 2050. Paris, France: International Energy Agency, IEA/OECD; 2008. p. 1-650.
- [3] International Energy Agency (IEA). Technology roadmap-solar photovoltaic energy. Paris, France: International Energy Agency, IEA/OECD; 2010. p. 1-48.
- [4] REN21: Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, Renewables 2012. Global Status Report (2012), <http://www.map.ren21.net/GSR/GSR2012_low.pdf>. Accessed 28 July 2012>.
- [5] International Renewable Energy Agency (IRENA), Renewable Energy Technologies: Cost analysis series. Volume 1: Power Sector. Issue 2/5. Concentrating Solar Power (2012), <http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/RE_Technologies_Cost_Analysis-CSP.pdf>. Accessed 1 August 2012>.
- [6] International Energy Agency (IEA). Trends in photovoltaic applications. Survey report of selected IEA countries between 1992 and 2009. Paris, France: International Energy Agency, IEA/OECD; 2010. p. 1-40.
- [7] M. Oliver y T. Jackson. The market for solar photovoltaics. Energy Policy 27 (1999) 371-385.
- [8] Greenpeace International, European Photovoltaic Industry Association (EPIA). Solar Generation 6. Executive Summary; October 2010. <<http://www.greenpeace.org/international/Global/international/publications/climate/2010/SolarGeneration2010.pdf>>.
- [9] U.S. Department of Energy (DOE). 2008 Solar Technologies Market Report. Washington, DC; 2010. <<http://www1.eere.energy.gov/solar/pdfs/46025.pdf>>.
- [10] CSP Today. CSP plant location maps; 2010. <<http://www.csptoday.com/csp/csp-world-map.pdf>>.

-
- [11] Protermosolar. CSP plants location in Spain; 2010. <<http://www.protermosolar.com/boletines/23/Mapa.pdf>>.
- [12] International Energy Agency (IEA). Technology roadmap. Wind Energy. Paris, France, International Energy Agency, IEA/OECD; 2009.
- [13] International Energy Agency (IEA). Technology roadmap-concentrating solar power. Paris, France: International Energy Agency, IEA/OECD; 2010. p. 1-52.
- [14] H. Winkler, A. Hughes, M. Haw. Technology learning for renewable energy: Implications for South Africa's long-term mitigation scenarios. Energy Policy 37 (2009) 4987-4996.
- [15] International Energy Agency (IEA). International Energy Agency Data Services; 2012. <<http://data.iea.org>>.
- [16] A. Ricci with contributions from NEEDS partners. New Energy Externalities Development for Sustainability. Policy use of the NEEDS results, 2009.
- [17] P. Viebahn, S. Kronshage, F. Trieb, Y. Lechon. Final report on technical data, costs, and life cycle inventories of solar thermal power plants. NEEDS: New Energy Externalities Developments for Sustainability; 2008 <<http://www.needs-project.org/RS1a/RS1a%20D12.2%20Final%20report%20concentrating%20solar%20thermal%20power%20plants.pdf>>.
- [18] V.S. Arunachalam y E.L. Fleischer. The Global Energy Landscape and Materials Innovation. MRS Bulletin, Volume 33, April 2008.