

Introducción a la transición energética y sus consecuencias

Pedro Linares Llamas

Profesor, Instituto de Investigación Tecnológica (IIT), ETS ICAI,
Universidad Pontificia Comillas

Nos encontramos actualmente al comienzo de una transición energética que puede cambiar de forma muy relevante la forma en la que generamos y consumimos energía. De un sistema energético basado predominantemente en los combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural) pasaremos, de acuerdo con lo previsto y deseado, a un sistema esencialmente renovable, lo que implicará cambios no sólo en el tipo de fuentes energéticas utilizadas, sino también en las formas de emplearlas para satisfacer nuestros servicios energéticos como climatización de edificios, movilidad, o procesos industriales.

La razón fundamental de esta transición energética es la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), y con ellas, las consecuencias del cambio climático. Un cambio climático que ya está comenzando a afectarnos de forma manifiesta a nivel global, con aumentos de temperatura y de la frecuencia de eventos climáticos extremos, y cuyas consecuencias se prevé que sigan acentuándose de forma creciente a menos que seamos capaces de reducir significativamente las emisiones causadas por la actividad humana de los gases que contribuyen a este fenómeno, en particular el dióxido de carbono (CO_2) y el metano. El sector energético es responsable de entre un 65 y un 70 % de las emisiones de gases de efecto invernadero totales, y por tanto uno de los ejes centrales de la reducción de estas emisiones.

Ahora bien, es importante subrayar que, precisamente por la razón antes citada, esta transición es muy distinta de las que han tenido lugar anteriormente, y por tanto tendrá seguramente distintas consecuencias. Las transiciones anteriores, como las que supusieron la introducción del petróleo, el gas natural, o la energía nuclear en nuestras matrices energéticas, fueron acumulativas: es decir, sumaron recursos energéticos para satisfacer una creciente demanda de energía; por otra parte, vinieron empujadas por mejoras tecnológicas y menores costes, de forma que fue fundamentalmente el mercado el que dirigió la transición.

Sin embargo, esta transición no puede ser acumulativa, sino sustitutiva: no se trata de que las nuevas fuentes energéticas renovables se añadan a las fuentes fósiles, sino de eliminar los combustibles fósiles de la matriz energética, sustituyéndolos con energías renovables. Esto supone, por otra parte, actuar también sobre la demanda, para asegurar que se adecúe a la disponibilidad de recurso (que, en el caso de las principales fuentes renovables como la fotovoltaica o la eólica, es inherentemente variable) y que sea capaz de utilizar vectores energéticos basados en estas fuentes renovables, como la electricidad o el hidrógeno verde (o en general los gases renovables).

El segundo elemento distintivo de esta transición es que las tecnologías necesarias para realizarla no son necesariamente competitivas. Aunque las energías fotovoltaica o eólica sí son actualmente rentables, las tecnologías de almacenamiento, de producción de gases renovables, de descarbonización de la industria o del transporte requieren aún de apoyos públicos. Y por tanto el mercado por sí solo no será capaz de realizar la transición sin políticas públicas que lo complementen. En este sentido, la transición energética en España no puede entenderse fuera del contexto de la Unión Europa, una de las regiones que está liderando la lucha contra el cambio climático, y que ha producido numerosa regulación a este respecto.

Y por último, esta es una transición que se pretende realizar en un plazo de tiempo muy inferior al de las pasadas. La urgencia para reducir las emisiones supone que la velocidad a la que es necesario que penetren las nuevas tecnologías es muy superior a la de las transiciones anteriores. Y esto puede suponer desajustes y costes mayores que en otras transiciones, al haber menos tiempo para la adaptación de los sectores más perjudicados.

Todas estas características crean una situación nueva y llena de retos tecnológicos, económicos y políticos. Ciudadanos y empresas, y en general nuestras sociedades y economías, deben responder a estos retos, y para ello deben entender bien las consecuencias que puede suponer la transición en cada uno de estos ámbitos.

Así, es necesario conocer los costes que puede suponer la transición, especialmente en el corto plazo, y también las oportunidades que pueden aparecer tanto desde el punto de vista de desarrollo de las tecnologías necesarias, como del cambio en la forma de invertir y operar respecto a los consumos de energía.

Los costes y oportunidades, en cualquier caso, dependerán de cómo se produzca la transición. Existen numerosos escenarios al respecto, algunos más optimistas y otros más pesimistas. La mayoría de los escenarios (como por ejemplo los desarrollados por la Agencia Internacional de la Energía) apuntan a una dicotomía evidente entre los escenarios «business-as-usual», es

decir, aquellos que resultarían de simplemente una continuación de las políticas actuales, y los escenarios que tratan de lograr la neutralidad climática en los plazos planteados por los organismos internacionales. Los primeros concluyen que, si no se aceleran o intensifican las políticas climáticas o energéticas, los fósiles seguirán proporcionando la mayoría de la energía a nivel global, con una ligera bajada del petróleo y el carbón, pero un mantenimiento del gas natural. En cambio, los escenarios que buscan la neutralidad climática requieren que los fósiles pasen a suponer menos del 20 % de la energía primaria en 2050, y que la electricidad aumente mucho su cuota de energía final (al ser la vía fundamental por la que penetran las energías renovables). Esta transición, además, deberá hacerse de forma ordenada para evitar disruptiones durante la misma.

La Unión Europea ya ha elaborado también sus escenarios y estrategias para alcanzar la neutralidad climática en 2050, y ha desarrollado una serie de políticas, comprendidas en el llamado paquete «Fit for 55» con las que pretende alcanzar estos objetivos.

En España, el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2023-2030, realizado por mandato europeo, plantea un escenario de transición alineado con los objetivos europeos, pero con un nivel de ambición muy elevado. Se pretende reducir un 55 % las emisiones de gases de efecto invernadero con respecto a 2005, y lograr un 48 % de penetración de energías renovables sobre el total de energía final (un 81 % en el caso de la energía eléctrica). Los objetivos de autoconsumo y almacenamiento se cifran en 19 GW y 22,5 GW, respectivamente, y se propone elevar la tasa de electrificación hasta el 35 %. Otra de las cifras llamativas es el objetivo de contar con 5,5 millones de vehículos eléctricos en 2030. Como consecuencia de esta transformación, el Plan anticipa mejoras significativas en términos de empleo o bienestar, así como reducciones en el coste de la energía. Desgraciadamente, este Plan no necesariamente se materializará, y menos si no se despliegan las políticas necesarias. De hecho, muchos agentes han advertido ya de la falta de realismo de los objetivos planteados a la vista de las políticas previstas.

En este número pretendemos ofrecer un compendio sólido del estado del conocimiento acerca de la transición energética en España y sus implicaciones para la sociedad, independiente de orientaciones políticas o ideológicas, y todo ello en un lenguaje que queremos accesible para el ciudadano y el empresario.

En primer lugar, Pablo Pintos, asesor del Parlamento Europeo, nos presenta el marco general en el que se inscribe la transición energética en España: la estrategia europea de descarbonización, y en particular el paquete Fit for 55. El artículo permite obtener una visión general de la estrategia energética actual de la UE y de la situación regulatoria de la transición energética.

El autor repasa la normativa europea actual en materia de energías renovables, eficiencia energética, mercados de gas y electricidad, transporte o industria, así como el mercado europeo de comercio de emisiones. Además, aborda los desafíos más inmediatos y describe los planes a futuro de la UE, donde destaca el enfoque de la competitividad y, concretamente, el anunciado Pacto Industrial Limpio.

Pintos nos recuerda que, según el recientemente publicado Informe Draghi, el sector energético europeo debe avanzar en su integración, fortalecer las interconexiones, y acelerar la innovación tecnológica para no quedar rezagado en la carrera hacia una economía baja en carbono. Por otra parte, la Unión Europea se enfrenta al desafío de implementar las numerosas iniciativas aprobadas en los últimos años. En este sentido, el Pacto Industrial Limpio y las iniciativas para acelerar la descarbonización industrial serán esenciales para hacer una Europa más competitiva. Finalmente, el autor subraya que la implementación efectiva de este marco sólo será posible con un enfoque integrado y coordinado, poniendo especial atención en los impactos sociales y económicos, de forma que se preserve el modelo social de la UE.

A continuación, Luis Rey y Mikel González-Eguino, investigadores del Centro Vasco para el Cambio Climático (BC3) nos resumen dónde estamos en España respecto a la transición energética. Utilizando los datos del Observatorio de la Transición Energética OTEA, los autores analizan la evolución del consumo energético y las emisiones de GEI en España, desde distintos puntos de vista. También tratan de explicar las causes detrás de los cambios producidos en los últimos años.

Los autores nos muestran cómo se han producido grandes avances, gracias a la expansión de energías renovables, que permiten que más de la mitad de la generación eléctrica provenga ya de estas fuentes, y a la reducción en el uso del carbón. Esta transformación ha logrado reducir a la mitad las emisiones de GEI del sector eléctrico en los últimos años. Sin embargo, España sigue enfrentándose a grandes retos para cumplir con los objetivos establecidos: en 2023 las emisiones eran aún sólo un 4 % inferiores a las de 1990. Y, en la última década, las emisiones del transporte no sólo no han disminuido, sino que han aumentado más de un 10 %. También es preocupante la evolución de la electrificación, que sigue estancada.

Rey y González-Eguino concluyen que queda mucho por hacer para alcanzar estos retos, que deben abordarse con mayor ambición, medidas coordinadas, y un esfuerzo conjunto de gobierno, empresas y ciudadanía, para poder lograr una transición justa, inclusiva y sostenible para todos.

Entrando ya en los elementos de la transición, José Pablo Chaves, Sébastien Huclin, y Andrés Ramos, investigadores del Instituto de Investigación Tecnológica (IIT) de la Universidad Pontificia Comillas, ofrecen una evaluación del potencial de integración de las energías renovables en España y el rol que puede jugar el almacenamiento. Chaves *et al.* repasan las cifras propuestas por el PNIEC para 2030, que alcanzan 62 GW para la energía eólica y 76 GW para la fotovoltaica, y explican que este crecimiento masivo sólo se podrá lograr si se despliegan fuentes de flexibilidad, tanto tecnológicas como de mercado, que permitan acomodar una generación variable e incierta como es la eólica y fotovoltaica. En este sentido, los sistemas de almacenamiento de energía como las baterías o la hidroeléctrica de bombeo son tecnologías clave.

Los autores presentan sus estimaciones de las necesidades de almacenamiento en el sistema eléctrico español en 2030, a las que tendrán que dar respuesta las baterías y los bombeos, en competencia con otras fuentes de flexibilidad. Las cifras ofrecidas por el modelo SEED, desarrollado en el IIT, muestran que todas las tecnologías consideradas: baterías, bombeos abiertos y cerrados, e hidráulica regulable, participarán en el sistema, con esta última siendo la

más relevante. Las tecnologías participarán en distinta medida en los servicios complementarios o un eventual servicio de rampas, que los autores también consideran fundamental en un sistema con alta integración de renovables. También se muestra la contribución que podrían hacer estas tecnologías a la firmeza del sistema, encontrando que las baterías no podrán estar presentes en las horas más críticas.

En cualquier caso, Chaves *et al.* concluyen que, según las simulaciones realizadas, todas las tecnologías de almacenamiento jugarán un papel clave para garantizar la seguridad de suministro y la flexibilidad del sistema. También recuerdan que existen importantes interdependencias entre los distintos servicios de firmeza y flexibilidad, que será preciso tener en cuenta. Por último, subrayan la importancia de contar con mecanismos que regulen y logren una participación adecuada de todas las tecnologías necesarias.

Como se ha mencionado anteriormente, la electrificación será un vector fundamental para la descarbonización. Pero hay una parte significativa de los consumos energéticos cuya electrificación es más difícil, y que por tanto requerirán de otros vectores energéticos como el hidrógeno o los gases renovables. Rafael Cossent, investigador del IIT-Comillas y director de la Cátedra de Estudios para el Hidrógeno, evalúa el potencial de utilización y producción de hidrógeno en España.

Cossent indica que existe una brecha significativa entre los objetivos fijados y la realidad de las plantas en funcionamiento. Sin embargo, también se puede afirmar que hay un gran interés por parte de inversores y promotores para desarrollar proyectos de hidrógeno renovable en España, algo a lo que contribuye su ventaja competitiva con respecto a otros países europeos.

El autor analiza también los posibles usos del hidrógeno a partir de los proyectos en desarrollo. Según la información disponible, la mayoría del hidrógeno se dedicaría a aplicaciones industriales (refino, fertilizantes e industria química). Si bien existen numerosos proyectos orientados al transporte, cuentan con una escala menor. En este sentido, será clave la transposición de la directiva europea de energías renovables, que deberá suponer un impulso para este vector energético.

Por último, Cossent señala los principales retos a los que se enfrenta el desarrollo de la industria del hidrógeno renovable. El primero de ellos, y fundamental, es la distancia entre el coste de producción y los precios que los potenciales consumidores estarían dispuestos a pagar. Será necesario pues optimizar costes de equipos y costes operativos (sobre todo el suministro de la energía), así como la cadena de transporte y suministro, que puede suponer costes de la misma magnitud que los de producción.

Otro gas renovable de gran interés es el biometano, procedente de residuos orgánicos y por tanto también interesante como vía de gestión de estos residuos. José Ignacio Linares, profesor de Comillas-ICAI, analiza el potencial para la generación y consumo de este gas en España. El biometano se produce a partir del biogás, pero tiene mayor valor añadido, ya que puede reemplazar al gas natural sin ninguna modificación de equipos o infraestructuras de transporte. También es una fuente de CO₂ biogénico para producir combustibles sintéticos libres de carbono.

Linares presenta estimaciones de costes de biometano, que pueden ser menores o comparables con el gas natural en caso de que el residuo esté centralizado; en casos de residuo disperso, los precios pueden ser más elevados. Sin embargo, no es el precio la única barrera: la percepción social, la demora en las autorizaciones, o la disponibilidad de recurso son también cuestiones a solventar. En cualquier caso, el autor concluye que su estabilidad de precios a largo plazo, su contribución a la economía circular, y la seguridad de suministro, pueden ser razones de peso para justificar políticas de apoyo público.

También de gran relevancia para el mundo rural es la integración de las energías renovables como la energía solar fotovoltaica en zonas de cultivo, la llamada energía agrivoltaica. Marta Varo Martínez y Luis Manuel Fernández de Ahumada, de la Universidad de Córdoba, introducen los sistemas agrivoltaicos y sus características fundamentales.

Así, comienzan definiendo sistema agrivoltaico como aquel sistema de producción dual en el que se integran la actividad agrícola y fotovoltaica en un mismo terreno de manera que se favorezcan sinergias positivas entre ambas actividades (y por tanto sin crear conflictos por el uso del suelo). En este sentido, frente al modelo actual de expansión de la fotovoltaica, la agrivoltaica favorece la economía en las zonas rurales, contribuyendo a paliar su despoblamiento. Se distinguen tres posibles configuraciones de sistemas agrivoltaicos: agrivoltaica elevada, agrivoltaica interespacial e invernaderos agrivoltaicos.

Los autores discuten las ventajas e inconvenientes de distintas configuraciones, esquemas de ayudas públicas, y experiencias desarrolladas en España. También discuten las barreras técnicas que incluyen, entre otras, las exigencias de diseño y mantenimiento, la seguridad, la gestión de la suciedad de los paneles, la inyección a la red de la electricidad generada, o la falta de definición de un marco legislativo adecuado. Su conclusión es que es fundamental desarrollar estudios experimentales que validen todos estos datos y permitan verificar la idoneidad de nuestros cultivos en sistemas agrivoltaicos con los condicionantes geográficos y climatológicos de nuestro entorno.

En el siguiente artículo, Rafael López Luque y José Cristóbal Ramírez Faz, de la Universidad de Córdoba, profundizan en las tecnologías más significativas para la agrivoltaica, describiendo las distintas posibilidades que se ofrecen comercialmente para cada una de las aplicaciones de la agrivoltaica. Los autores también plantean varios indicadores de viabilidad para las instalaciones agrivoltaicas, como la calidad de la producción agrícola, el rendimiento energético, el rendimiento agrícola, u otros.

En una segunda parte de su artículo, López Luque y Ramírez Faz realizan una serie de consideraciones sobre la aceptación social de esta tecnología, y sobre los modelos de negocio que pueden contribuir a su viabilidad. Además, describen el marco legal y nivel de desarrollo en varios países de la Unión Europea y en España, así como las perspectivas de futuro para nuestro país, concluyendo que en España este sector es prácticamente inexistente, pero que cabe esperar que 2025 suponga un punto de inflexión para esta tecnología.

Hasta aquí el número repasa las alternativas fundamentales para el suministro de energía; sin embargo, como ya se ha mencionado, la transición no se producirá sólo desde el lado

de la oferta, sino que también tendrá implicaciones y requerirá cambios desde el lado de la demanda. Por tanto, en la segunda parte del número pasamos a describir cinco aspectos que serán claves en la transición.

En primer lugar, Paolo Mastropietro, investigador de Comillas-IIT, presenta los posibles diseños de mercado eléctrico en un contexto de alta penetración de renovables, y las consecuencias que pueden tener para los consumidores. El autor describe los distintos segmentos del mercado: diario, intradiario, servicios complementarios, y mercados a plazo; y analiza cómo deberían evolucionar en el futuro para hacer frente a los desafíos del proceso de descarbonización. En general, se esperan cambios en la granularidad temporal, en la integración de recursos de demanda, y en el acoplamiento del mercado europeo. En los mercados a plazo, el desafío fundamental es aumentar su liquidez.

Posteriormente Mastropietro evalúa distintos mecanismos regulatorios que pueden complementar el mercado. Respecto al mercado de capacidad, necesario para garantizar la seguridad de suministro, identifica la necesidad de calcular correctamente la aportación de cada tecnología, de integrar eventos extremos, y de fomentar la participación de la demanda. En cuanto a los sistemas de apoyo a las renovables, que considera seguirán siendo necesarios, el reto está en combinar sus ventajas para los inversores con su integración en el mercado. Igualmente en el caso de los apoyos al almacenamiento.

El impacto de esta evolución para los consumidores, según el autor, será posiblemente un aumento de costes, aunque algunos podrán obtener ahorros importantes si adaptan su consumo a las necesidades del sistema.

A continuación Manuel Pérez Bravo y Tomás Gómez San Román, investigadores de Comillas-IIT, describen las opciones disponibles para los consumidores en materia de autoconsumo y comunidades energéticas. En su opinión, estos esquemas de autoconsumo y de implicación ciudadana en torno a la energía pueden conllevar beneficios económicos, sociales y medioambientales para los propios consumidores y para el sistema eléctrico en general. Pero para ello es preciso conocer bien sus ámbitos y restricciones de aplicación, algo que los autores explican detalladamente.

Respecto al autoconsumo, Pérez y Gómez consideran que existen dudas razonables sobre si se darán las condiciones de rentabilidad necesarias para alcanzar los ambiciosos objetivos establecidos por el PNIEC. La solución puede pasar por la instalación de almacenamiento, algo que también les permitiría participar en otros mercados como los descritos en artículos anteriores, y que se ve favorecido por la tendencia decreciente de costes de inversión de las baterías.

Las comunidades energéticas por el contrario no cuentan aún con un marco regulatorio para su desarrollo, y las iniciativas en marcha pueden considerarse testimoniales. Aún quedan muchas cuestiones por resolver a este respecto, algo que evidentemente impide que se activen los beneficios de estas asociaciones.

Para terminar con esta revisión de los cambios esperables en los modelos de consumo de energía eléctrica, David Robinson analiza las posibilidades de flexibilización de la demanda de electricidad, y el potencial de los agregadores.

El autor explica los cambios en la legislación, así como en las condiciones económicas y tecnológicas, que incentivan un papel más activo de los consumidores y les permiten contribuir a la transición energética de, al menos, cinco maneras: autoconsumo, electrificación, flexibilidad, seguridad del sistema y reducción de costes de red, y apoyo político.

Según Robinson, en la legislación española actual ya existen incentivos para que los consumidores de electricidad en España sean activos en el autoconsumo y la flexibilidad implícita de la demanda. Sin embargo, la futura legislación debe motivar una mayor participación de los consumidores, invitar a la implantación de nuevos modelos empresariales y sociales y crear oportunidades comerciales para apoyar a los consumidores activos y una transición energética justa. El autor ofrece ejemplos de interés en este sentido, tanto de otros mercados internacionales como de iniciativas pioneras en España.

Por último, el número presta atención más en detalle a dos sectores consumidores de energía. Timo Gerres, de Enagás y la Universidad Pontificia Comillas, presenta las opciones de descarbonización de la industria no intensiva en energía. Gerres agrupa estas opciones en cuatro: las mejoras de eficiencia, el cambio de fuentes de energía, la captura de emisiones o el cambio de insumos materiales; y luego procede a detallarlas con ejemplos concretos. También destaca que existen soluciones estandarizadas para gran parte de la industria que permiten reducir las emisiones asociadas al uso de energía, pero no permiten transformar las industrias de materias primas, que requieren soluciones específicas.

A continuación el autor resume las medidas principales que afectan a la descarbonización de la industria en Europa, centrándose en las ayudas públicas a la inversión, fundamentales para corregir la elevada incertidumbre a la que se enfrenta la industria. Gerres también repasa en detalle las propuestas del Plan Industrial del Pacto Verde, y el Reglamento para desarrollar capacidad industrial para fabricar tecnologías neutras en emisiones, y apunta a los elementos que faltan por desarrollar o detallar, entre otros, una estrategia coherente para impulsar el uso circular de materiales. Gerres concluye con una serie de reflexiones sobre las oportunidades que se deben aprovechar para descarbonizar la industria de forma competitiva.

Por su parte, Manuel Pérez Bravo, investigador de Comillas-IIT, muestra las opciones de descarbonización del transporte de mercancías, un sector particularmente relevante para España tanto por su peso en las emisiones como por su relevancia económica. El autor comienza señalando que la electrificación del transporte pesado es más compleja que para el ligero, por la mayor necesidad de potencia y autonomía de los vehículos; y repasa las principales opciones basadas en hidrógeno o combustibles renovables. También señala las principales barreras para su despliegue, como los altos costes iniciales y elevada infraestructura.

Pérez Bravo también resume la abundante normativa europea, que juega un papel crucial al establecer objetivos ambiciosos para promover las tecnologías y combustibles sostenibles, o para incentivar el desarrollo de infraestructura de recarga para los combustibles alternativos. El autor señala que a futuro se espera que las mejoras tecnológicas y la reducción de costes aceleren la penetración de estas soluciones; pero que en cualquier caso será necesario implementar soluciones tecnológicas y regulatorias adaptadas a los distintos segmentos del

transporte pesado, garantizando que el cambio sea viable tanto técnica como económicamente para todos los actores involucrados.

Confío en que la lectura de este número pueda aportar una visión amplia, pero accesible, de la transición energética en España. En cualquier caso, los distintos artículos ofrecen referencias en las que ampliar la información. También se puede obtener abundante detalle en las webs de los autores, o adicionalmente, en un podcast de reciente creación impulsado por la Universidad Pontificia Comillas (Transición energética... sin cuentos).

