

REAL ACADEMIA DE DOCTORES
DE ESPAÑA

“LA ENERGÍA DEL FUTURO”

DISCURSO A PRONUNCIAR POR LA

**EXCMA. SRA. DRA. DÑA. MARÍA DEL CARMEN
CLEMENTE JUL**

EN EL ACTO DE TOMA DE POSESIÓN
COMO ACADÉMICO DE NÚMERO MEDALLA
NÚMERO 5, CORRESPONDIENTE A LA
SECCIÓN 5ª DE CIENCIAS EXPERIMENTALES

EL DIA 17 DE ABRIL DE 2024

Y CONTESTACIÓN DE LA ACADÉMICA DE NÚMERO

**EXCMA. SRA. DRA. DÑA BEATRIZ YOLANDA
MORATILLA SORIA**

DE LA SECCIÓN 8ª DE INGENIERÍA



**MADRID
MMXXIV**

REAL ACADEMIA DE DOCTORES
DE ESPAÑA

“LA ENERGÍA DEL FUTURO”

DISCURSO A PRONUNCIAR POR LA
**EXCMA. SRA. DRA. DÑA. MARÍA DEL CARMEN
CLEMENTE JUL**

EN EL ACTO DE TOMA DE POSESIÓN
COMO ACADÉMICO DE NÚMERO MEDALLA
NÚMERO 5, CORRESPONDIENTE A LA
SECCIÓN 5ª DE CIENCIAS EXPERIMENTALES

EL DIA 17 DE ABRIL DE 2024

Y CONTESTACIÓN DE LA ACADÉMICA DE NÚMERO

**EXCMA. SRA. DRA. DÑA BEATRIZ YOLANDA
MORATILLA SORIA**

DE LA SECCIÓN 8ª DE INGENIERÍA



**MADRID
MMXXIV**

ÍNDICE

PRESENTACIÓN	5
1. INTRODUCCIÓN Y CONTEXTO	11
2. LA POLÍTICA ENERGÉTICA	18
3. SEGURIDAD Y SOSTENIBILIDAD ENERGÉTICA	26
4. PRINCIPALES FUENTES DE ENERGÍA	31
5. PERSPECTIVA ENERGÉTICA GLOBAL EN EL CORTO Y MEDIO PLAZO	54
6. PERSPECTIVA ENERGÉTICA EN ESPAÑA	66
7. CONCLUSIONES	74
8. BIBLIOGRAFÍA	77
9. CONTESTACION DE LA EXCMA. SRA. DRA. DÑA BEATRIZ YOLANDA MORATILLA SORIA	83

PRESENTACIÓN

Excelentísimo Sr. Presidente de la Real Academia de Doctores de España

Excelentísimas Señoras y Señores Académicos

Señoras y Señores

El comienzo de esta ceremonia solemne en la Real Academia de Doctores de España, la única de las academias españolas multidisciplinar, lo que la convirtió cuando se creó en 1922 en una verdadera avanzada para su tiempo y que lo continúa siendo hoy, es para mí la expresión de sentimientos y la evocación de recuerdos. Como decía mi admirada Marie Curie: La vida no es fácil para ninguno de nosotros. Pero no importa. Hay que perseverar y, sobre todo, tener confianza en una misma.

Mi sincera gratitud para los tres académicos que presentaron mi candidatura a Académica de Número, Medalla N^o5 adscrita a la Sección 5^a de Ciencias Experimentales de esta prestigiosa Real Academia de Doctores de España. Dicha candidatura iba avalada, en atención a lo dispuesto en el artículo 5.2 del Reglamento, por tres egregios Académicos de Número, uno procedente de la propia Sección de Ciencias Experimentales y otros dos de Secciones distintas:

el Dr. D. Rafael Bachiller García, de la Sección 5^a de Ciencias Experimentales (Medalla N^o65), excepcional astrónomo director del Observatorio Astronómico Nacional (IGN), de brillante trayectoria internacional en estrecho contacto con instituciones europeas y estadounidenses, con presencia constante en la Academia; el Dr. D. José Ramón Casar Corredera, de la Sección 8^a de Ingeniería (Medalla N^o48), insigne maestro de tantos ingenieros y profesores a lo largo de su dilatada trayectoria en la Universidad Politécnica de Madrid, Universidad en la que he desarrollado toda mi actividad docente, investigadora y de gestión como Profesora Adjunta, Profesora Titular, Catedrática de Universidad y Catedrática Emérita, y el Dr. D. Rafael Morales-Arce Macías, de la Sección 7^a de Ciencias Políticas y de la

Economía (Medalla nº57), Doctor en Ciencias Económicas, Premio Nacional de Fin de Carrera, Catedrático de Universidad, magnífica y reconocida autoridad en el campo de Economía Financiera y de muy activa presencia en la Academia a través de sus conferencias y publicaciones específicas. Contar con el apoyo de tan ilustres figuras, supone para mí un gran honor y una confianza que jamás espero defraudar.

Mi especial gratitud a la Dra. Dña. Beatriz Yolanda Moratilla Soria, Académica de Número de la Sección 8ª de Ingeniería (Medalla nº118) de esta Real Academia, Doctora en Ingeniería Industrial Profesora de la Universidad Pontificia de Comillas, Directora de la Cátedra Rafael Mariño de Nuevas Tecnologías Energéticas y Presidenta del Comité de Energía y Recursos Naturales del Instituto de la Ingeniería de España, por aceptar contestar a mi discurso de toma de posesión como Académica de Número.

Gratitud también a todos los Académicos que integran esta docta institución, que con sus votos me apoyaron para poder ser Académica de Número y que desde hoy me propongo servir con lealtad, entusiasmo y eficacia. El ejemplo de estos Académicos y de los integrantes de la Academia en su conjunto ha sido mi motivación para que como Académica Correspondiente haya participado en las actividades de la Academia intensamente a todos los niveles desde que ingrese en esta docta institución.

Expreso mi más sentido agradecimiento a cuantos compañeros y amigos se han dado cita en este magnífico salón del paraninfo de la Universidad Complutense, y recuerdo con especial emoción a los maestros que me formaron a lo largo de mi vida profesional. En la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Complutense de Madrid durante mi licenciatura de entre todos, y sin querer desmerecer al resto, me gustaría destacar al Dr. D. Enrique Gutiérrez Ríos, Catedrático de Química Inorgánica, y al Dr. D. Enrique Costa Novella, Catedrático de Ingeniería Química, en la Junta de Energía Nuclear a mi director de tesis, el Dr. D. Antonio Travesi Jiménez, que me introdujo en el mundo de la energía nuclear con sus grandes conocimientos en activación neutrónica, y en la Universidad Politécnica

de Madrid al Dr. D. Emilio Llorente Gómez, Académico de la Real Academia de Doctores de España y Catedrático de Carboquímica y Petroquímica en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía, en cuya cátedra ingresé para iniciar mi carrera como profesora universitaria y que culminé en el Departamento de Energía y Combustibles de la citada universidad.

En el plano personal agradecer a mi familia y recordar a mis padres, que ya no están, a su lección de vida que me acompaña en todo momento, me enseñaron a regirme por los principios del amor al estudio, la honestidad, la lealtad y el respeto.

Hoy me honro en suceder al Dr. D. Benjamín Fernández Ruiz en el sillón de esta Real Academia que tan dignamente ocupó. Tuve la suerte de conocer al Catedrático Fernández Ruiz, mi antecesor en la medalla N^o5, desde el momento que entró como Académico de Número en esta Real Academia, a la cual yo ya pertenecía como Académica Correspondiente, en su misma Sección de Ciencias Experimentales. Del Dr. Fernández Ruiz destaco su rica personalidad llena de matices que le permitió desarrollar una excelente y fecunda actividad docente, investigadora y de gestión en la Universidad Complutense de Madrid. Catedrático Emérito de la Universidad Complutense, en su brillante historial cabe destacar que formó parte del primer equipo de gobierno del Rector Gustavo Villapalos Salas, siempre en el recuerdo de la Real Academia de la que fue presidente, como Vicerrector de Departamentos y Centros. Gran científico entró en la Real Academia en el año 2001, su candidatura fue avalada por los Académicos Ángel Vian Ortuño, María Cáscales Angosto y Federico López Mateos y su discurso de ingreso versó sobre su admirado Ramón y Cajal, del que se consideraba su discípulo.

La mayor parte de mi vida académica la he dedicado a la energía, desde la energía nuclear en mi tesis doctoral, el desarrollo de nuevas tecnologías limpias para los combustibles fósiles, las tecnologías de captura, usos y almacenamiento de CO₂ hasta la utilización de hidrógeno como vector energético, en mi discurso de toma de posesión tengo que hablar de la energía del futuro.

1. INTRODUCCIÓN Y CONTEXTO

La energía la usamos constantemente en nuestra vida cotidiana, está presente en los aparatos que utilizamos, en nuestros cuerpos, y nos permite movernos y realizar trabajos. A priori no ocupa espacio y no puede verse, pero sí sentimos sus efectos y podemos medirla. Siempre está presente y realiza cambios en nuestros cuerpos, hace que nuestro mundo cambie y nosotros con él. En el siglo IV antes de Cristo, el filósofo griego Aristóteles definió la energía como la capacidad de transformar y producir cambios en los objetos, permitir el movimiento y realizar un trabajo.

La energía, por tanto, solo podemos medirla por los efectos que produce en la materia, los cuerpos y los objetos, como por ejemplo un cambio de estado, de sólido a líquido, o un desplazamiento, del primer al segundo piso. En la actualidad, conocemos varios tipos de energía: electromagnética, química, térmica, eléctrica, cinética, nuclear, gravitacional, etc.

Durante el último siglo hemos sido testigos del aumento en las ratios de eficiencia de nuestras centrales térmicas de carbón, mediante el desarrollo e implementación de procesos y tecnologías más eficientes de combustión, y de la optimización en la gestión de las corrientes y procesos de refrigeración. Al igual que en las centrales térmicas de fuelóleo, de gas y nucleares. Pero lo mismo ha sucedido con las renovables, donde las primeras células fotovoltaicas alcanzaban una eficiencia inferior al 5%, para transformar la radiación recibida del sol en energía eléctrica, y en la actualidad consiguen una eficiencia superior al 40%.

Estos incrementos de las ratios de eficiencia en procesos, sistemas y tecnologías, ha permitido al ser humano adaptarse mejor al entor-

no, satisfacer sus necesidades con menos recursos, aumentar su esperanza de vida, ampliar sus horizontes geográficos y desarrollarse más rápidamente.

Es lo que podríamos denominar puntos de inflexión, como momentos en los que cambios tecnológicos específicos repercuten en la sociedad en general.

Y este concepto de aprovechamiento eficiente de los recursos energéticos, lo que denominamos eficiencia energética, está directamente relacionado con el término sostenibilidad, ya que, además, algunos de los combustibles y recursos energéticos que ha venido utilizando la humanidad desde el origen de los tiempos son finitos, limitados.

El término de sostenibilidad o desarrollo sostenible tiene su origen en el Informe Brundtland, de 1987, publicado por la ONU y redactado por la Dra. Gro Harlem Brundtland. En él define la sostenibilidad como “satisfacer las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer las posibilidades de las del futuro para atender sus propias necesidades”.

Este aumento consciente por conseguir un mejor aprovechamiento de los recursos y combustibles que utilizamos, finitos o ilimitados, ha venido principalmente motivado por el interés que suscita el **cambio climático** del planeta en el que vivimos, y que cada vez observamos con mayor preocupación.

Las Naciones Unidas, en su Acción por el Clima, establece que el cambio climático se refiere a los cambios a largo plazo de las temperaturas y los patrones climáticos. Estos cambios pueden ser naturales, debido a variaciones en la actividad solar o erupciones volcánicas grandes. Pero desde el siglo XIX, las actividades humanas han sido el principal motor del cambio climático, debido principalmente a la quema de combustibles fósiles como el carbón, el petróleo y el gas.

En 1979, la primera Conferencia Mundial sobre el Clima identificó el cambio climático como un problema global urgente, y ya entonces se hizo un llamamiento a los gobiernos a hacer frente a este reto. Posteriormente, En 1990, el Grupo o Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) publicó su primer Informe de Evaluación sobre el estado del clima global, que se convirtió en principal referencia de las negociaciones para el establecimiento de una convención sobre el cambio climático en el contexto de la Asamblea General de Naciones Unidas. En Nueva York, en el año 1992, se firma el Tratado de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.

El objetivo último de este tratado es la “estabilización de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera a un nivel que impida interferencias antropogénicas (causadas por el hombre) peligrosas en el sistema climático”. Este nivel debería lograrse en un plazo suficiente para permitir que los ecosistemas se adapten naturalmente al cambio climático, asegurar que la producción de alimentos no se vea amenazada y permitir que el desarrollo económico prosiga de manera sostenible. Esto se traduce en una necesidad urgente de cambiar nuestros modelos productivos y de consumo hacia patrones bajos en emisiones, es decir, evitar la quema de combustibles fósiles que es el mayor causante del calentamiento global. Además, sitúa la responsabilidad en los países desarrollados.

Los científicos dedicados a las cuestiones climáticas han demostrado que las personas somos responsables del calentamiento global de los últimos 200 años. Las actividades humanas, tales como las mencionadas arriba, generan gases de efecto invernadero que elevan la temperatura del planeta al ritmo más rápido de los 2.000 años pasados. Los principales gases de efecto invernadero, de origen antropogénico, según apunta la ONU y el IPCC son el dióxido de carbono (CO_2) y el metano (CH_4), seguidos del óxido nitroso (N_2O), clorofluorocarbonos (CFC's) y tetracloruro de carbono (CCl_4).

Afirman que la temperatura media de la Tierra es ahora 1,1 °C más elevada que a finales del siglo XIX, antes de la revolución industrial, y más elevada en términos absolutos que en los últimos 100.000

años. La última década, entre los años 2011 y 2021, fue la más cálida registrada. En esa línea, cada una de las cuatro décadas últimas ha sido más caliente que cualquier otra década anterior desde 1850.

Miles de científicos y revisores gubernamentales coincidieron en que limitar el aumento de la temperatura global a no más de 1,5 °C para el final de este siglo, hacia el año 2100, nos ayudaría a evitar los peores impactos climáticos y a mantener un clima habitable en nuestro planeta. Sin embargo, las políticas actuales apuntan a un aumento de la temperatura de 2,8 °C para finales de siglo.

Estos científicos también afirman que las emisiones que provocan el cambio climático proceden de todas las partes del mundo y afectan a todos, pero algunos países generan muchas más que otros. Los siete mayores emisores son China, Estados Unidos, India, la Unión Europea, Indonesia, Rusia y Brasil, y fueron los causantes de la mitad de las emisiones de gases de efecto invernadero a nivel mundial en 2020. Pero, curiosamente, también suponen más de la mitad de la población del planeta, unos 4.500 millones sobre 8.000 millones de personas en la actualidad.

Analizando los últimos registros de datos macro disponibles para emisiones de dióxido de carbono (CO₂) en el año 2021, encontramos que las emisiones relacionadas con la energía, que provienen principalmente de la combustión de combustibles fósiles y la industria, ascienden a 36.700 Mt de CO₂, y las generadas por la agricultura y explotación de la tierra a 3.900 Mt. El ranking de los países más contaminantes en términos absolutos lo encabeza China con un 31% del total, seguido de Estados Unidos con un 12%, India con un 6,5%, Rusia con un 5%, Japón con 2,5%, Irán con un 1,7% Alemania con un 1,6%, Corea del Sur con un 1,5%, Indonesia con un 1,5%, Arabia Saudita con un 1,5% y Canadá con un 1,4%. España representa un 5,7% del total.

Por tanto, los diez países que encabezan este ranking son responsables de más del 71% del total de emisiones de CO₂. Cabe señalar que el porcentaje de emisiones de CO₂ relacionadas con la energía en términos absolutos aumentó en 2021 frente a las del año anterior

en un 6%, ya que la economía mundial se recuperó con fuerza de la crisis del COVID-19, y dependió en gran medida del carbón para impulsar ese crecimiento.

Otro análisis que suele realizarse, como indicador del nivel de “eficiencia” de una economía, es el de las emisiones de CO₂ por cada 1.000 dólares de Producto Interior Bruto (PIB) generado en cada uno de los países. Ahí observamos que China desciende al 12º puesto, Rusia al 13º, India al 43º, Estados Unidos al puesto 63º, Japón al 74º, Alemania al 109º y España al 118º. Pero otro dato curioso, analizando cada país, es el reparto o contribución de cada habitante, expresado como toneladas de CO₂ per cápita. En este caso nos encontramos a China en el 25º puesto con 8,73 tCO₂ por habitante, Estados Unidos en el 12º puesto con 14,24 tCO₂ por habitante, India en el puesto 111º con 1,9 tCO₂ por habitante, Rusia en el 15º puesto con 13,52 tCO₂ por habitante, Arabia Saudita en el 8º puesto con 16,63 tCO₂ por cada habitante y Alemania en el 32º puesto con 8 tCO₂ por habitante. España se encuentra en el 52º puesto con 4,99 tCO₂ por habitante.

Hay que destacar que en los últimos 30 años solo en dos ocasiones las emisiones de CO₂ bajaron con respecto a los años anteriores, una en el año 2009 debido a la crisis económica del año 2008, y la otra en el año 2020 debido a la pandemia.

Por sectores, aproximadamente el 35% de las emisiones de CO₂ se generan en la producción de electricidad, calor y otras formas de energía, el 24% en la agricultura, silvicultura y uso de la tierra, el 20% en la industria, el 15% en el transporte y el 6% en el sector residencial y edificios.

Del total de emisiones de gases de efecto invernadero provocadas por el sector del transporte a nivel global, el transporte por carretera supone el 75%, el 11,5% lo genera la aviación y el 10,5% el transporte marítimo. Aproximadamente el 1% de emisiones las emite el ferrocarril y el 2% restante se originan durante el transporte de com-

bustibles fósiles por tubería. Del total de emisiones que origina el transporte por carretera, el 65% se debe a coches y transporte de pasajeros y el 35% a camiones y transporte de mercancías.

Con relación al cambio climático, hasta la Santa Sede se ha pronunciado. En las 2 últimas Cartas Encíclicas, el *Laudato Sí*, del 24 mayo 2015, y el *Laudate Deum*, del 4 de octubre de 2023, el Papa Francisco hace un llamamiento al hombre posmoderno a que cuide, proteja y haga un buen uso de los recursos de la madre Tierra, a lo que hace referencia como “el cuidado de la casa común”. Afirmo indudable que el impacto del cambio climático perjudicará de modo creciente en las vidas y familias de muchas personas, y que sentiremos sus efectos en los ámbitos de la salud, las fuentes del trabajo, el acceso a los recursos, la vivienda y las migraciones forzadas entre otros. Alerta que es un problema social global que está íntimamente relacionado con la dignidad de la vida humana. Alude a la crisis climática global, al origen antropogénico de esta, a los daños y riesgos que afrontamos por la actual degradación del ambiente. Reflexiona sobre una débil política internacional en esta materia, las diferentes conferencias internacionales del clima celebradas, sus avances y fracasos, y las medidas adoptadas para no superar el objetivo de aumento de 1,5°C la temperatura global del planeta.

Una de las medidas que a nivel global consiguen mayor aceptación para intentar detener el cambio climático, limitando el aumento de temperatura en 1,5°C para el año 2100, es desplazar el uso de combustibles fósiles, que contienen carbono en su composición y son los principales responsables de las emisiones de dióxido de carbono en la mayoría de sectores en los que se emplean, para generar electricidad, para calentarnos, desplazarnos y en el transporte de personas y mercancías, en la fabricación de productos, equipos y materiales, y en infinidad de procesos industriales para producir materiales, sustancias, etc.

Por tanto, el objetivo es sustituir estos combustibles, fuentes de energía y materias primas de origen fósil y que contienen carbono,

por otras que eviten la emisión de este gas de efecto invernadero de larga vida. Es lo que se denomina descarbonización, y consiste en descarbonizar la economía.

En este sentido, casi todos los países, gobiernos y multitud de empresas, pequeñas, medianas y multinacionales de diferentes sectores, han definido diferentes estrategias de descarbonización con el objetivo de alcanzar una reducción significativa de emisiones de gases de efecto invernadero en sus procesos y operaciones, estableciendo distintos calendarios orientados a conseguir la neutralidad de carbono, huella de carbono cero, cero neto o neutralidad climática.

El alcance de estos objetivos implica realizar una transición energética. La transición energética hace referencia al desplazamiento de estos combustibles y su sustitución por otros medioambientalmente neutros en emisiones de gases de efecto invernadero. Supone cambios y mejoras en los procesos existentes, así como nuevos procesos e implantación de sistemas novedosos y alternativos, cambios en los hábitos de consumo, etc.

Por tanto, la transición energética implica un conjunto de cambios en los modelos de producción, distribución y consumo de la energía para utilizarla de una manera más sostenible, una transición a nivel económico y social.

A lo largo de estos párrafos, he ido introduciendo los conceptos principales sobre los que se basará la estructura de mi discurso, como son la energía y sus formas, la eficiencia energética, la sostenibilidad, el cambio climático, la descarbonización y la transición energética. Además, considero estos conceptos necesarios para entender el contexto en el que en la actualidad se desarrolla y aborda la energía del futuro.

2. LA POLÍTICA ENERGÉTICA

La política energética global es un tema complejo y relevante que abarca diversos aspectos, como la seguridad del suministro, la sostenibilidad ambiental, la eficiencia energética, el acceso universal a la energía y la transición justa.

La política energética global es el conjunto de decisiones y acciones que determinan el uso y la gestión de los recursos energéticos a nivel mundial. Su objetivo es garantizar el acceso a la energía de forma segura, sostenible y asequible para todos los países y regiones. La política energética global abarca aspectos como la producción, el transporte, el consumo, la eficiencia, la diversificación, la innovación y la cooperación internacional en materia de energía.

Algunos de los principales desafíos que enfrenta la política energética global son la transición hacia fuentes de energía bajas en carbono, la mitigación del cambio climático, la seguridad energética, la reducción de la pobreza energética y la gobernabilidad global del sector energético.

La política energética es por tanto el conjunto de medidas y acciones que los gobiernos adoptan para garantizar el suministro, la calidad y el precio de la energía que consumen sus ciudadanos y sus industrias.

La energía es un recurso estratégico que influye en el desarrollo económico, social y ambiental de los países, así como en su seguridad y soberanía. Por eso, la política energética debe estar alineada con los objetivos nacionales e internacionales de desarrollo de cada país, así como con los desafíos globales como el cambio climático y la transición hacia una economía baja en carbono.

Los principales países del mundo tienen diferentes políticas energéticas, según sus recursos naturales, su nivel de desarrollo, su estructura productiva y su posición geopolítica. Algunos ejemplos son:

- Estados Unidos: Era el mayor consumidor de energía primaria del mundo hasta el año 2009, y el mayor productor hasta 2005, en ambos casos superado por China. Pero, en la actualidad, vuelve a ser el mayor productor de energía. Con una gran dependencia del petróleo y el gas natural, pero también con una importante capacidad de generación eléctrica a partir de fuentes renovables y nucleares. Su política energética se basa en garantizar la seguridad energética nacional, diversificar las fuentes de suministro, impulsar la innovación tecnológica y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.
- China: Ha sido el segundo mayor productor y consumidor de energía mundial por detrás de Estados Unidos, pero durante algunos años ocupó la primera posición como mayor productor y consumidor de energía del mundo. En la actualidad es el mayor consumidor de energía del mundo. Con una fuerte demanda impulsada por su crecimiento económico y demográfico, registró en el año 2022 una aceleración de la producción energética del 5,6% y del consumo del 3%. Su política energética se orienta a satisfacer las necesidades energéticas de su población y su industria, aumentar la eficiencia energética, desarrollar las energías renovables y limpias, y mejorar la calidad del aire y el medio ambiente. Debido a su dependencia del petróleo y gas, ha elaborado una política energética que le permita abrir nuevas y seguras vías de abastecimiento, mitigar su dependencia, estimular la producción de energías renovables y obtener derechos de explotación para sus empresas estatales tanto en China como en el resto del mundo.
- Unión Europea: Fue el tercer consumidor y el segundo importador de energía del mundo, con una alta dependencia de proveedores externos, especialmente de Rusia, pero la demanda ha ido decreciendo en los últimos años. Su política energética

se enfoca en construir un mercado energético común, diversificar las fuentes y las rutas de abastecimiento, promover las energías renovables y la eficiencia energética, y liderar la lucha contra el cambio climático y la descarbonización de la economía.

- Rusia: Es el tercer productor, el cuarto consumidor y el primer exportador de energía del mundo, con una gran riqueza en recursos fósiles como el petróleo, el gas natural y el carbón. Su política energética se basa en aprovechar su potencial energético para impulsar su desarrollo económico, reforzar su posición geopolítica e influir en los mercados internacionales.
- India: Es el quinto productor y el tercer consumidor de energía del mundo, experimentó en el año 2022 un incremento del 7,3%, con una creciente demanda asociada a su desarrollo económico y social. Su política energética se dirige a garantizar el acceso universal a la energía, especialmente a la electricidad, aumentar la producción doméstica de energía, diversificar las fuentes de generación, mejorar la eficiencia energética y mitigar los impactos ambientales.

La política energética de cada país depende en gran medida de las fuentes de energía que utiliza para satisfacer su demanda. Las fuentes de energía pueden ser renovables o no renovables, primarias o secundarias, y tener diferentes impactos ambientales, económicos y sociales. Algunas de las fuentes de energía más utilizadas en los principales países del mundo son:

- Estados Unidos: El petróleo es la principal fuente de energía, seguido por el gas natural, el carbón, la energía nuclear y las renovables. El petróleo se usa principalmente para el transporte, el gas natural para la generación eléctrica y la calefacción.

ción, el carbón para la producción de electricidad, la nuclear para la generación eléctrica y las renovables para la diversificación y la reducción de emisiones.

- China: El carbón es la principal fuente de energía, seguido por el petróleo, el gas natural, la hidroeléctrica y las renovables. El carbón se usa principalmente para la generación eléctrica y la industria, con una participación del 63% en su mix de generación eléctrica, el petróleo para el transporte y la industria, el gas natural para la generación eléctrica y la calefacción, la hidroeléctrica para la generación eléctrica y las renovables para el desarrollo rural y la mitigación del cambio climático.
- Unión Europea: El petróleo es la principal fuente de energía, seguido por el gas natural, el carbón, la nuclear y las renovables. El petróleo se usa principalmente para el transporte, el gas natural para la generación eléctrica y la calefacción, el carbón para la producción de electricidad, la nuclear para la generación eléctrica y las renovables para el cumplimiento de los objetivos climáticos y energéticos.
- Rusia: El gas natural es la principal fuente de energía, seguido por el petróleo, el carbón, la nuclear y las hidroeléctricas. El gas natural se usa principalmente para la exportación, la generación eléctrica y la calefacción, el petróleo para la exportación y el transporte, el carbón para la producción de electricidad y la industria, la energía nuclear para la generación eléctrica y las hidroeléctricas para la diversificación y el aprovechamiento de los recursos hídricos.
- India: El carbón es la principal fuente de energía, seguido por el petróleo, el gas natural, la hidroeléctrica y las renovables. El carbón se usa principalmente para la generación eléctrica y la industria, el petróleo para el transporte y la industria, el gas natural para la generación eléctrica y la calefacción, la

hidroeléctrica para la generación eléctrica y las renovables para el acceso universal a la energía y la reducción de la pobreza energética.

Tampoco debemos olvidar que la previsión de la demanda es un factor clave a la hora de definir una política energética óptima, dimensionar la necesidad de recursos y adecuar las inversiones necesarias para desarrollar los planes que se establezcan en ella. En el año 2022 se estima que la demanda global de energía aumento un 1,3%.

La Unión Europea, que se posiciona como líder y abanderada de la lucha contra el cambio climático y la descarbonización de la economía, estableció en el año 2005 un nuevo gravamen para tratar de penalizar a los sectores que emiten una mayor cantidad de gases de efecto invernadero, como la industria y el transporte. Los derechos de emisión de CO₂ permiten controlar la contaminación producida por las empresas y la industria.

El objetivo de la Unión Europea es proponer la descarbonización de su industria y, mediante el mercado bursátil de derechos de emisiones, obliga a los mayores emisores a pagar un gravamen por cada tonelada de gases de efecto invernadero que emiten a la atmósfera. Su funcionamiento es sencillo. Cada año se ponen en circulación unos nuevos derechos mediante un sistema de subastas. Se fija un límite y el total de emisiones no puede ser más elevado que el máximo subastado. Esto tiene un impacto importante para el medioambiente, pero también para los precios. Al tratarse de una oferta limitada, que además va en descenso, puesto que cada año se disminuye el máximo que sale a subasta, la alta demanda hace que los precios vayan en constante aumento. En los últimos 10 años el derecho de emisión ha subido desde 3,5 euros por tonelada (€/t) a más de 90 €/tCO₂. Además, desde Bruselas se han establecido medidas para evitar que el precio pueda descender.

A nivel global, el cambio climático parece ser el eje central sobre el que se desarrollan y articulan las diferentes políticas energéticas de

cada país o región. Todas las medidas propuestas van encaminadas a luchar contra el cambio climático y contener el calentamiento global para que no exceda del límite fijado en 1,5°C de aumento en el año 2100 con respecto a los niveles preindustriales.

En este sentido, la energía y el uso que se haga de ella y de los recursos para obtenerla está en el centro del debate.

La Conferencia de las Partes (COP) es el órgano político supremo de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), y cuenta con 197 estados o partes. Se reúne cada año y la primera reunión (COP1) se celebró en Berlín, Alemania, en marzo de 1995. La última reunión (COP28) se ha celebrado en Dubái, Emiratos Árabes Unidos, en diciembre de 2023. El principal objetivo es contener el calentamiento global dentro del límite establecido para mitigar los efectos del cambio climático.

Una tarea clave para la COP es examinar las comunicaciones nacionales y los inventarios de emisiones presentados por las Partes. A partir de esta información, la Conferencia de las Partes evalúa los efectos de las medidas adoptadas por las Partes y los progresos realizados en la consecución del objetivo último de la Convención. Esta última reunión, la COP28, ha sido un punto de inflexión donde se ha evaluado el progreso y grado de cumplimiento de los objetivos establecidos en el Acuerdo de París, durante la COP21.

Por lo tanto, cada estado o parte establece su política energética, acciones y medidas, para garantizar que se alcanzan los objetivos de emisiones en función del grado de compromiso adquirido en la COP.

En general, vemos que las diferentes políticas energéticas, planes y medidas adoptadas están orientadas a alcanzar unos objetivos comunes, como son:

- Incrementar la penetración de fuentes renovables en el mix de generación y el consumo final de energía,

- Aumentar la eficiencia energética, el autoconsumo y la generación distribuida,
- Descarbonizar la industria, procesos y el sector transporte, y
- Asegurar la independencia energética.

Para poder llevar a cabo las medidas y acciones definidas en la política energética, se realiza una previsión de las inversiones necesarias para acometerlas, y en ocasiones se acompañan de una regulación, ayudas e incentivos fiscales para impulsar su aplicación.

Un concepto interesante y crítico en la definición de las políticas energéticas globales y de cada país, nación o región, es el de mix energético o matriz energética. El mix energético global, de una región o país en particular, está compuesto por la contribución de cada tipo de energía al total de la energía consumida a nivel global, por esa región o país. Al ser la electricidad una forma de energía se puede hablar de mix energético para producir electricidad, atendiendo a la contribución de cada tipo de combustible y recurso respecto del total utilizado, y se denomina mix de generación.

Por lo tanto, el proceso para definir y establecer un mix energético o de generación eléctrica adecuado, requiere tener en cuenta diversas cuestiones energéticas, introduciendo unos factores clave simples, claros e imparciales, como indicadores principales o fundamentales para impulsar la planificación energética adecuada de una región o país.

Estos factores clave tienen en cuenta características como la sostenibilidad, la seguridad energética, el panorama económico y social, la capacidad de crecimiento, el cambio climático, la calidad del aire y la estabilidad social, entre otros. Estos mismos factores clave y la relación entre ellos, porque están interconectados, suelen o deberían ser evaluados mediante un diálogo fructífero y crítico entre los expertos, los líderes, los gobiernos, el público y los tomadores de de-

cisiones, para identificar prioridades de política energética y establecer estrategias nacionales e internacionales para lograr un sistema energético sostenible y un desarrollo próspero.

Por sus características, los factores clave se ubican y organizan abarcando el mayor espectro posible de cuestiones energéticas, siendo lo más recomendable agruparlos según su naturaleza en factores geológicos, sociales y económicos.

Por tanto, se pone de relieve la estrecha relación del concepto sostenibilidad con la definición e implantación de adecuadas políticas energéticas para una región o país.

3. SEGURIDAD Y SOSTENIBILIDAD ENERGÉTICA

Seguridad y sostenibilidad energética son dos conceptos relacionados con el uso responsable y eficiente de los recursos energéticos, así como con la protección del medio ambiente y el bienestar social.

La seguridad energética se refiere a la capacidad de garantizar el suministro de energía de manera continua, asequible y diversificada, evitando las interrupciones o las fluctuaciones que puedan afectar al desarrollo económico y social.

La sostenibilidad energética se refiere al uso de fuentes de energía que minimicen el impacto ambiental, reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero y otros contaminantes, y que promuevan la equidad social, facilitando el acceso a la energía a toda la población.

La seguridad y la sostenibilidad energética son dos objetivos que se complementan y que requieren de una planificación estratégica a nivel nacional e internacional. Algunas de las medidas que se pueden adoptar para lograrlos son:

- Diversificar el mix energético, incorporando fuentes de energía renovables, autóctonas y bajas en carbono, como la solar, la eólica, la hidráulica, la biomasa o los biocombustibles.
- Impulsar una política energética, pudiendo ser común por regiones, que potencie las interconexiones entre países o estados vecinos, el mercado único de la energía y la cooperación con otros países o estados productores o consumidores de energía.
- Fomentar el ahorro y la eficiencia energética en todos los sectores, mediante el uso de tecnologías más eficientes, el diseño

de edificios e infraestructuras más sostenibles, la sensibilización y educación de los consumidores y la aplicación de incentivos fiscales o normativos.

- Desarrollar la sostenibilidad energética, teniendo en cuenta los aspectos ambientales, sociales y económicos del uso de la energía, y cumpliendo con los compromisos internacionales en materia de cambio climático y desarrollo sostenible.

Centrándonos en la seguridad de suministro, existen diferentes metodologías, como por ejemplo la de la Agencia Internacional de la Energía (AIE) y la del *World Energy Council* (WEC), entre otros, para analizar los parámetros críticos que proporcionan la situación de la agenda global energética e identifican las prioridades para construir la energía sostenible del futuro, y para evaluar la trayectoria potencial que tome la demanda de energía.

Hace más de 10 años (en el año 2012), la Agencia Internacional de la Energía señalaba que los factores principales que marcan la tendencia en materia de energía son:

- Las acciones y políticas adoptadas por los gobiernos de los diferentes países,
- La actividad económica,
- Los cambios demográficos, que afectan al tamaño y composición de la demanda energética, directamente y a través de su impacto en el crecimiento económico y el desarrollo,
- El precio de la energía, incluyendo el CO₂,
- El grado de avance y mejora en la eficiencia al adoptar la mejor tecnología energética disponible y los nuevos desarrollos tecnológicos.

Otro estudio, el *Model of Short-term Energy Security* (MOSES), realizado por la Agencia Internacional de la Energía, establece un grupo

de indicadores de riesgos externos e internos, que destaca la vulnerabilidad de los sistemas energéticos y puede ser utilizado para trazar la evolución del perfil de la seguridad energética de un país.

Con todo ello, se ha encontrado una vía para definir la seguridad energética mediante diferentes tipos de riesgos considerando aspectos a largo plazo. Se ha denominado comúnmente “*four As*”, en castellano “las cuatro Aes”, de la seguridad energética: *Availability* o disponibilidad, *Accessibility* o accesibilidad, *Affordability* o asequibilidad y *Acceptability* o aceptabilidad.

El estudio *World Energy Issues Monitor*, publicado en 2013 por el *World Energy Council*, y actualizado en 2015, analiza la implantación de un sistema de energía sostenible, apuntando cuestiones clave que los líderes debieran considerar para definir la agenda global de energía y la agenda energética de un país o región. Considera cuatro categorías que abarcan diferentes aspectos que deben ser evaluados y monitorizados: los riesgos macroeconómicos, cuestiones geopolíticas y regionales, políticas energéticas y el negocio ambiental, y la visión energética y la tecnología.

El 25 de septiembre de 2015, la Asamblea General de Naciones Unidas estableció los Objetivos de Desarrollo Sostenible (conocidos como ODS). Los líderes mundiales adoptaron un conjunto de 17 objetivos globales interconectados para erradicar la pobreza, proteger el planeta y asegurar la prosperidad para todos como parte de una nueva agenda de desarrollo sostenible. Cada objetivo tiene unas metas específicas, se pretende alcanzarlos para el año 2030 e involucra a los gobiernos, el sector privado y la sociedad civil.

Si bien el ODS-7 Energía Asequible y No Contaminante establece unas metas a 2030 relacionadas con la energía, como garantizar el acceso a la electricidad de toda la sociedad y en especial de los países más pobres, garantizar el acceso universal a servicios energéticos asequibles, fiables y modernos, aumentar la proporción de energía renovable en el conjunto de fuentes energéticas, duplicar la tasa mundial de mejora de la eficiencia energética, aumentar la cooperación internacional para facilitar el acceso a la investigación y la

tecnología relativas a la energía limpia, promover la inversión en infraestructura energética y tecnologías limpias, etc. los 17 ODS están relacionados. Ya que, aumentar la salud y bienestar dependerá en gran medida del grado de implantación de tecnologías limpias para generar electricidad, garantizar el acceso a agua limpia y de saneamiento implicará el desarrollo de tecnología innovadora y sostenible para la gestión del agua y su reutilización, o fomentar una educación y enseñanza de calidad que permita adquirir los conocimientos teóricos y prácticos necesarios para desarrollar la tecnología y procesos sostenibles que garanticen un buen uso de los recursos energéticos e infraestructura eléctrica por los futuros ingenieros y científicos, o los tratamientos que mejoren nuestra calidad y esperanza de vida por los futuros médicos, por ejemplo.

Para la consecución de estos objetivos se establecen unas necesidades de financiación para cada uno de ellos con horizonte temporal el año 2030.

En este sentido, se han implantado diversos índices para medir el grado o rating de sostenibilidad de empresas e inversiones. Para realizar la transición energética conforme a los Objetivos de Desarrollo Sostenible, es necesario realizar proyectos energéticos, en infraestructuras, etc. que requieren de una inversión que normalmente se financia con fondos de distinto origen, público y privado. Así escuchamos el término “inversión socialmente responsable”, y es que los inversores seleccionan las empresas por las que apuestan según lo sostenibles que sean, el tipo de proyecto que acometan y cómo lo ejecuten. Para obtener esta información recurren a los ratings de sostenibilidad.

Los ratings de sostenibilidad son una evaluación de los criterios ESG (*Environmental and Social Governance*), y de la viabilidad de una organización. Las agencias de clasificación o ratings son los organismos que se encargan de proporcionar información sobre la sostenibilidad de las empresas y, en general, de los proyectos de inversión. Algunas de las agencias más importantes son Moody's, Standard&Poor's (S&P) y Fitch. Para clasificar a las empresas, los ratings aplican índices de sostenibilidad basados en criterios ESG. Los criterios para hacer

la clasificación abarcan todos los aspectos ESG, incluyendo aspectos ambientales relacionados con cómo las empresas o los proyectos de inversión gestionan la biodiversidad y el cambio climático.

En este contexto, con los antecedentes y el panorama energético actual, tenemos por delante grandes retos a los que tendrá que enfrentarse la humanidad para cambiar el actual modelo económico y social, que presenta una gran dependencia de los combustibles fósiles.

La realización de esta transición energética, que se vislumbra necesaria, conllevará ciertos cambios de hábitos, algunos de ellos muy profundos, en los modelos de consumo de la sociedad actual, y afectará al empleo, profesiones, sistema fiscal, legislación, la forma en cómo nos relacionamos, etc. y forzará a realizar una revisión de los planteamientos que hacemos en medicina, filosofía y otras ramas del saber, la política y la legislación de las próximas décadas. Lo denominan la cuarta revolución industrial, y será necesario acometer con detalle y conocimiento esta revolución para que la transición sea un acierto, un verdadero avance para la mayoría de las personas, mejore la calidad de vida y prosperidad de la humanidad, al mismo tiempo que asegure la conservación del planeta.

4. PRINCIPALES FUENTES DE ENERGÍA

Las principales fuentes de energía que se utilizan en la actualidad son los combustibles fósiles, la energía nuclear y las energías renovables.

Los combustibles fósiles son el petróleo, el carbón y el gas. Su origen proviene de la descomposición de materia orgánica, animales, plantas y microorganismos, en un proceso de transformación a elevada temperatura y presión durante millones de años. Pero abordar en detalle el estudio del origen de los combustibles fósiles implicaría profundizar en geología, estratigrafía, litología y mineralogía, ciencias con un campo de conocimiento muy amplio.

Todos los combustibles fósiles contienen carbono en su composición, en mayor o menor medida, y al utilizarse como combustible, mediante un proceso exotérmico de oxidación, liberan CO₂ además de otros gases de efecto invernadero. Se les denomina hidrocarburos, y se encuentran en estado líquido como el petróleo, en estado gaseoso o en estado sólido como el carbón.

En el año 2021, justo antes de la pandemia del COVID-19, más del 80% de toda la energía mundial provenía de los combustibles fósiles. La mayor contribución correspondía al petróleo con aproximadamente un 30%, seguida del carbón con un 27% y del gas natural con un 24%. El 44% de las emisiones globales fueron generadas por el carbón, seguido del petróleo con un 32% y del gas natural con un 22%. China y Estados Unidos juntos fueron responsables del 45% de las emisiones globales originadas por el uso de estos combustibles, seguidos por la Unión Europea, India, Rusia y Japón.

A pesar de la creciente adopción de energías renovables y de los avances tecnológicos que favorecen su aplicación, los combustibles

fósiles siguen siendo la principal fuente de energía del mundo. Y es que, los combustibles fósiles todavía representan cerca del 80% de toda la energía primaria que se consume a nivel mundial.

Se estima que la demanda global de energía aumente a un ritmo anual del 0,7% hasta el año 2030, la mitad del ritmo de crecimiento registrado durante la última década, y con las políticas energéticas actuales los combustibles fósiles seguirán siendo imprescindibles para satisfacer la demanda prevista.

En el año 2022 más del 51% de la electricidad mundial se generó a partir de combustibles fósiles, principalmente carbón y gas natural.

El petróleo o aceite mineral es conocido y empleado desde la antigüedad. Los pueblos de Mesopotamia comerciaban con asfaltos, naftas y betunes. Hace unos 500 años a.C. existían pozos de petróleo al sur de la actual Irán. Parece que los chinos conseguían extraerlo con cañas de bambú y tubos de bronce, y lo utilizaban para usos domésticos y alumbrado. Los fenicios comerciaban con petróleo que obtenían de las orillas del Mar Caspio, y los griegos destruían las flotas enemigas derramándolo en el mar y prendiéndole fuego.

Pero el petróleo entró en juego como recurso energético a finales del siglo XIX, tras realizarse su primera perforación industrial en 1859 por Edwin Drake en Pensilvania, Estados Unidos. A raíz de ahí, se estimuló la perforación de los pozos en lo que se conoce como “la fiebre del oro negro”, su uso comenzó a desbancar al carbón que era la fuente de energía más importante, y así nació la industria petrolera.

Su aprovechamiento como fuente de energía es a partir de sus derivados o fracciones, que se obtienen en las refinerías, como los gases de petróleo, naftas, queroseno, gasolinas, gasóleos y fuelóleos, aceites pesados, parafinas y asfaltos.

El mayor consumo de petróleo lo registra el sector transportes, incluido aviación y marítimo, con más del 50%, seguido por la industria petroquímica. A la generación de electricidad se destina menos de un 5%.

Aproximadamente el 60% de las reservas de petróleo se encuentran en Oriente Medio. En el año 1960 se funda la Organización de Países Exportadores de Petróleo (OPEC), en Bagdad, Iráq. Está formada por 13 países que en origen poseían el 80% de las reservas probadas de petróleo. Sus miembros son Argelia, Angola, Arabia Saudita, Congo, Emiratos Árabes Unidos, Guinea Ecuatorial, Gabón, Irán, Iraq, Kuwait, Libia, Nigeria y Venezuela.

En el año 2016, con el avance de la tecnología y el desarrollo industrial del *fracking* y del petróleo de esquisto, principalmente por Estados Unidos, la OPEC buscó nuevos aliados para seguir controlando el mercado y la oferta de petróleo. Es entonces cuando la OPEC firma un acuerdo con otros diez países productores y se crea la OPEC+. Entre los nuevos países se encuentra Rusia, que producía el 13% del total mundial, Méjico, Kazajistán, Omán, Malasia, Azerbaiyán, Baréin y Sudán del Sur. En el año 2022 la OPEC controlaba el 40% de la producción total, pero en la actualidad la OPEC+ controla alrededor del 60% de la producción mundial de petróleo.

El *fracking* es una técnica que permite la extracción de petróleo y gas (se conoce como gas de esquisto) del subsuelo mediante la aplicación de presión hidráulica. También se denomina fracturación hidráulica o hidrofracturación. Consiste en realizar una perforación en el subsuelo para levantar un pozo que alcance entre los 1.600 y los 2.000 metros de profundidad, con el propósito de crear canales de elevada permeabilidad por medio de la inyección de agua a alta presión para vencer la resistencia de la roca, generalmente pizarra. Canadá y Estados Unidos han aplicado muy activamente el desarrollo de esta técnica en los últimos años. Tanto es así que desde el año 2019 Estados Unidos ha aumentado su producción de petróleo y gas en un 70% aplicando esta técnica.

En 2022 la lista de los países que más petróleo producen la encabeza Estados Unidos, seguido de Arabia Saudita, Rusia, Canadá, Iraq y China. La producción de petróleo aumentó ese año en un 4,2%.

La demanda de petróleo en el mundo ha aumentado más de un 10% a lo largo de la última década. En el año 2023 se ha observado una leve tendencia a la baja en el sector transportes, que ha sido compensada por un aumento de la demanda en la industria petroquímica.

Esta leve disminución de la demanda de petróleo en 2023, registrada principalmente en países desarrollados, ha sido motivada por la penetración de fracciones de combustible biodegradable en las mezclas de combustibles líquidos utilizados en los diferentes sectores y procesos, como los implantados en las denominadas biorrefinerías, que procesan aceites usados y de origen vegetal.

Se prevé que la demanda global de petróleo aumente a razón de un 0,7% anual hasta el año 2045, principalmente en países que no pertenecen a la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), con India a la cabeza de la lista. Este aumento se registrará principalmente en los sectores transporte, aviación y petroquímico. En concreto, los principales movimientos se esperan en el transporte marítimo, con descensos del 55%, frente a un aumento en la producción de plásticos. Para ello, se espera una inversión de unos 14.000 billones de dólares hasta el año 2045, principalmente en actividades de exploración y producción, conocidas como *upstream*.

El mineral de carbón es una roca sedimentaria orgánica, compuesto por carbono, oxígeno, nitrógeno y agua. También puede contener otros elementos inorgánicos, como azufre, silicio, hierro, aluminio, potasio y sodio, que producen la ceniza si se somete el mineral a un proceso de combustión. El valor del carbón se clasifica en función de la relación carbono e hidrógeno (C/H). Cuanto mayor sea esta relación implica que el carbón es de más valor o de mayor rango y,

por tanto, con mayor contenido energético. Así podemos clasificar, de mayor a menor rango, antracitas, hullas bituminosas y subbituminosas y lignitos.

El año 2022 se extrajeron más de 8.000 Mt de carbón, registrando un incremento del 2% y alcanzando un máximo histórico. El mayor productor del mundo es China, con más del 50%, seguido de India, Estados Unidos, Indonesia, Australia y Rusia. Pero China (53% del total) e India también son los mayores consumidores e importadores de carbón. Y en respuesta al aumento de precios y escasez de la oferta, ambos países han optado recientemente por aumentar su producción nacional.

Con las políticas actuales, las previsiones apuntan a una disminución del 45% en la producción mundial de carbón entre los años 2023 y 2050.

A diferencia del resto de combustibles fósiles, las reservas de carbón se encuentran bastante repartidas. Este hecho ha servido para que haya más estabilidad en los precios del carbón en comparación con otros recursos energéticos, y que éste contribuya de manera importante al autoabastecimiento energético de muchos países. Estados Unidos posee la mayor cantidad de reservas con aproximadamente el 28% del total. Le siguen Rusia con cerca del 18% y China con el 13%. También se encuentra en Australia, India, Kazajistán, Ucrania, Colombia, Venezuela, Alemania, España, etc.

Aproximadamente el 80% del carbón que se extrae en el mundo es carbón térmico, es decir, el utilizado para generar calor y electricidad. El 20% restante se denomina carbón metalúrgico, que presenta un mayor contenido en carbono, menos cenizas y poca humedad, y es una parte esencial del proceso de fabricación del acero.

El carbón térmico se utiliza principalmente en centrales térmicas de combustión, donde el fluido de trabajo, generalmente agua, se utiliza para generar electricidad. Son centrales que implican un alto grado de desarrollo científico de proceso y de materiales, de todas las disciplinas de la ingeniería, de construcción y operación.

En el año 2022, aproximadamente el 36% de la energía eléctrica mundial se generó a partir del carbón, y casi un 25% a partir de gas natural. La demanda eléctrica aumentó un 1,3% hasta los casi 30.000 TWh y, en este sentido, el carbón experimentó un crecimiento del 2%.

El gas natural es un hidrocarburo mezcla de gases ligeros que se encuentra en la naturaleza y se originó hace millones de años. Principalmente contiene metano, cuya formulación es CH_4 y es más ligero que el aire, pero normalmente incluye también cantidades variables de otros alcanos, como propano, butano, pentano, hexano, etc. y en ocasiones un pequeño porcentaje de CO_2 , N_2 , H_2S o ácido sulfhídrico y H_2 .

Más del 70% de las reservas de gas natural están situadas entre Oriente Medio y las Repúblicas resultantes de la disgregación de la Unión Soviética. Al igual que el petróleo y a diferencia del carbón, las reservas de gas están más concentradas en unos pocos países productores.

Como he indicado anteriormente, en el año 2022, aproximadamente el 25% de la electricidad mundial se generó a partir de gas natural. Fue el sector donde más se utilizó el gas natural, seguido por la industria para generar una gran variedad de compuestos, como hidrógeno, metanol y amoníaco, y del sector residencial para calefacción principalmente.

A raíz de la invasión de Ucrania por parte de Rusia al inicio del año 2022, los precios del gas natural presentan una enorme volatilidad, con unos picos jamás vistos anteriormente, lo que ha venido marcando su demanda en los últimos 2 años, en concreto para generar electricidad y por la industria para producir otros compuestos de alto valor añadido, registrándose en ese año una contracción en la demanda mundial del 1%. En el 2023 el comercio de gas natural ha registrado un aumento del 13% respecto del 2022.

En concreto, la demanda de gas en la Unión Europea era satisfecha en su mayoría por Rusia, pero su precio llegó a multiplicarse por cua-

tro, cambiando el origen del gas e importándose en su mayoría de Noruega y Estados Unidos, aumentando las importaciones de gas natural licuado (GNL). Estados Unidos es el primer exportador global de GNL, seguido de Rusia.

También se ha registrado un aumento de la demanda por parte de China y el sudeste asiático, especialmente tras la pandemia del COVID-19. Por tanto, Europa se encuentra actualmente compitiendo con Asia por los cargamentos de GNL procedentes de Estados Unidos y Qatar.

Con la aplicación de las políticas energéticas actuales se espera un crecimiento anual de un 2,2% en la demanda de gas natural, alcanzando su pico en el año 2030 y manteniéndose estable hasta el 2050. Se prevé que a partir del año 2040 pueda haber un repunte motivado por un aumento en el uso del gas natural para producir hidrógeno con captura de CO₂, conocido como hidrógeno azul.

Por tanto, el gas seguirá siendo fundamental como fuente de generación eléctrica de respaldo de las energías renovables, así como en la industria. Estados Unidos se posiciona como el mayor consumidor y uno de los mayores productores de gas en el período analizado hasta 2050.

La crisis del petróleo en 1973 fue un catalizador para el cambio del panorama energético, impulsando el desarrollo de la eficiencia energética en los procesos y el despliegue de la tecnología nuclear.

El descubrimiento de la energía nuclear se remonta a principios del siglo XX, con los trabajos de Marie y Pierre Curie, quienes aislaron el radio en 1898. En 1911, Ernest Rutherford descubrió la fisión nuclear, un proceso en el que el núcleo de un átomo se divide en dos o más núcleos más pequeños.

En este proceso de fisión se libera una gran cantidad de energía. Aproximadamente el 80% de la energía aparece como energía cinética de los productos de fisión, la cual se transforma en calor inmediatamente. Los neutrones que se desprenden en cada fisión del

átomo vuelven a golpear otro átomo provocando nuevamente su fisión, en lo que se conoce como reacción en cadena. Pero para poder utilizar una reacción en cadena es preciso sostenerla, es decir, que no falten neutrones, y controlarla, es decir, que no haya neutrones en exceso.

El primer prototipo de reactor nuclear, el Chicago Pile-1, en Chicago, Estados Unidos, entró en funcionamiento en 1942. El proyecto fue dirigido, muy de cerca, por Enrico Fermi y se instaló en la Universidad de Chicago. Utilizaba uranio 235 enriquecido (^{235}U) y grafito como moderador. Se considera la primera reacción de fisión nuclear en cadena controlada y automantenida.

La primera central nuclear comercial del mundo, la Central Nuclear de Obninsk, para producir electricidad se construyó en Oblast de Kaluga, Rusia, y entró en funcionamiento en 1954. Consistía en el reactor AM-1 de 5 MW de potencia, de diseño ruso, utilizaba uranio y grafito como moderador, y su rendimiento térmico alcanzaba solo un 17%.

A partir de entonces, se han desarrollado distintos reactores y tecnologías de generación nuclear, con varias potencias. Cada país ha ido desarrollando diferentes diseños empleando distinto combustible, moderador y refrigerante.

En el año 1968 se abrió a la firma el Tratado de No Proliferación de Armas Nucleares, y entró en vigor el 5 de marzo de 1970. El 11 de mayo de 1995 el Tratado se prorrogó indefinidamente. Con 191 Estados parte, es el tratado del ámbito de la no proliferación nuclear, promueve los usos pacíficos de la energía nuclear y el desarme nuclear con mayor número de adhesiones.

Al final de diciembre de 2023, como publica la red PRIS del Organismo Internacional de Energía Atómica, en el mundo hay 412 reactores nucleares en operación que hacen más de 370 GW de potencia nuclear instalada, 25 reactores nucleares en parada (unos 21 GW) principalmente en Japón debido al tsunami que azotó la costa de

Fukushima en el año 2011, y 58 nuevos reactores en construcción (unos 60 GW adicionales) la mayoría de ellos en China (22 reactores, más de 22 GW).

Existen 35 países con reactores nucleares, que cubren aproximadamente el 4% de la demanda de energía primaria y producen alrededor del 10% de la electricidad mundial. Los principales países productores de energía nuclear son Estados Unidos (93 reactores en operación), Francia (56 reactores en operación), China (55 reactores en operación), Rusia (37 reactores en operación), República de Corea del Sur (25 reactores en operación), Canadá (19 reactores en operación), Ucrania (15 reactores en operación), Japón (12 reactores en operación), Reino Unido (9 reactores en operación) y España (7 reactores en operación).

A diferencia de otras tecnologías de generación de electricidad, la energía nuclear presenta un coste de inversión muy elevado, principalmente en el diseño y construcción de las instalaciones y centrales de generación, del orden del 58% del total de costes de generación, con un coste importante en operación y mantenimiento, pero el menor coste en combustible, del orden del 12%, comparado con otras tecnologías de generación como el gas natural en ciclos combinados, que supone alrededor del 75%, o en las centrales térmicas del carbón donde el combustible supone cerca del 50% del coste de generación.

Como se ha indicado anteriormente, la energía nuclear se utiliza principalmente para generar electricidad, pero también tiene otros usos, como la propulsión naval -en submarinos- y la producción de radioisótopos para aplicaciones médicas, industriales y de investigación.

En los últimos años, se ha producido un aumento del interés en la energía nuclear, debido principalmente a la preocupación por el cambio climático y la necesidad de reducir la dependencia de los combustibles fósiles. Después de un largo debate y sus correspondientes negociaciones, la Comisión Europea ha incluido la energía nuclear en la lista de actividades económicas medioambientalmente

sostenibles a las que se aplica la conocida como “Taxonomía de la UE”, con ciertas condiciones, como limitando en el tiempo su actividad y exigiéndole cumplir unos requisitos específicos en condiciones de transparencia. Recordemos que el Reglamento sobre taxonomía se enmarca en el plan de acción de la Comisión para financiar el crecimiento sostenible, y tiene por objeto impulsar la inversión verde y evitar el lavado de imagen ecológico de las empresas. La generación nuclear representa cerca del 26% de la energía eléctrica producida en la Unión Europea.

Por un lado, la energía nuclear es una fuente de energía limpia y segura que puede ayudar a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, pero, por otro lado, la energía nuclear está asociada con riesgos ambientales y de seguridad, como la producción de residuos radiactivos.

Los residuos radiactivos son los desechos que contienen elementos cuyos núcleos son inestables y por ello emiten radiaciones alfa, beta o gamma. Aunque los generan muchas actividades humanas y procesos industriales, la fuente principal de ellos son las centrales nucleares y la industria armamentística de los países que poseen bombas nucleares.

En la mayoría de los reactores nucleares actualmente en operación, tan solo se quema o aprovecha cerca de un 5% del uranio que se introduce en el reactor, manteniéndose por lo tanto alrededor de un 95% del uranio fisionable en lo que se denomina combustible gastado. Primeramente, este combustible se almacena en las piscinas de las centrales de manera controlada, asegurando su refrigeración permanente. Por lo general, pues difiere de unos países a otros, el combustible gastado se reprocesa para reducir su volumen, disminuir la actividad y recuperar los fragmentos de material aún fisionable. Mediante el reprocesamiento buena parte de los residuos puede terminar de nuevo en el reactor, como nuevo combustible, y los que no se pueden o quieren recuperar se tratan y almacenan a largo plazo en una ubicación controlada que puede variar en función de la política y normativa de cada país.

Pero los reactores más modernos, los reactores rápidos o reactores reproductores, de cuarta generación, se diseñan con la capacidad de cerrar el ciclo de combustible, aprovechando muchísimo mejor el combustible, minimizando la generación de residuos y operando de manera más sostenible y segura que los de su generación anterior. Algunos de estos reactores nucleares son capaces de reciclar el uranio empobrecido y usarlo de nuevo como combustible. Por el momento existen diferentes diseños que suelen operar a mayor temperatura y permiten una refrigeración alternativa al agua, mediante gas, sales fundidas, sodio, etc. Algunos países como Estados Unidos, China, Francia, India, Japón, Reino Unido, Canadá, etc., se proponen poner en funcionamiento al menos un reactor de este tipo en los próximos años.

Igualmente, se observa una tendencia global, principalmente en países que cuentan con tecnología nuclear, en el diseño y construcción de reactores modulares de pequeña y media potencia (por debajo de 300 MW). Un nuevo diseño de reactor nuclear más compacto incorpora las ventajas de la portabilidad y facilidad de construcción, lo que permite reducir costes y transportarlos a distintos lugares de difícil acceso. Además, presentan un alto nivel de seguridad, ya que utilizan factores de seguridad pasivos basados en los fenómenos de la naturaleza. El interés por este tipo de diseños radica en el deseo de reducir los costes de inversión directa, simplificar el procedimiento de licenciamiento, acortar los períodos de construcción y hacer posible que las centrales puedan emplazarse en sitios aislados, lejos de las grandes redes de transporte de electricidad.

El conocimiento de la energía atómica nos proporciona otra vertiente adicional a la fisión, y es la fusión nuclear. El desarrollo de esta tecnología podría proporcionar en el futuro una gran cantidad de energía de forma segura y sostenible, sin generar residuos ni emisiones.

La reacción nuclear de fusión es el proceso mediante el cual dos núcleos atómicos se unen para formar uno de mayor peso atómico, convirtiéndose parte de la masa de los reactivos en energía. Aunque la investigación en fusión nuclear comenzó hace más de 50 años,

todavía no se ha conseguido desarrollar un método tecnológico capaz de generar una tasa de fusiones nucleares lo suficientemente alta para que la energía producida pueda ser aprovechada con fines civiles.

Un ejemplo de reacciones de fusión son las que tienen lugar en el sol, en las que se produce la fusión de núcleos de hidrógeno para formar helio, liberando en el proceso una gran cantidad de energía en forma de radiación electromagnética, que alcanza la superficie terrestre y que percibimos como luz y calor.

Aunque existen diversas reacciones de fusión nuclear, la opción más viable para el aprovechamiento energético es el uso de deuterio y tritio, dos isótopos del hidrógeno, como combustible. La mayor dificultad para producir una alta tasa de reacciones de fusión es que se debe confinar, comprimir y calentar el combustible hasta condiciones extremas donde la materia se encuentra en estado de plasma, llegando a alcanzar temperaturas de millones de grados y presiones del orden de Mbar, un millón de veces la presión atmosférica. En este sentido, se estudian dos alternativas: el confinamiento inercial y el confinamiento magnético.

Hace casi 30 años, un grupo de países industrializados acordaron un proyecto para desarrollar una fuente de energía nueva, más limpia y sostenible. Así, en noviembre de 1985, con la idea de acometer un proyecto internacional de colaboración para desarrollar la energía de fusión con fines pacíficos, nació el proyecto ITER.

ITER es el mayor experimento de fusión del mundo, en el que 35 naciones colaboran para construir y operar un reactor nuclear de fusión de tipo Tokamak. Su diseño conceptual comenzó en 1988, y la construcción arrancó en 2010. Se ubica en Saint Paul-lez-Durance, cerca de Aix-en-Provence, al sur de Francia.

El objetivo principal de ITER es la investigación y demostración de plasmas en combustión, plasmas en los que la energía de los núcleos de helio producidos por las reacciones de fusión es suficiente para mantener la temperatura del plasma, reduciendo o eliminando así la

necesidad de calentamiento externo. El ITER también probará la disponibilidad e integración de tecnologías esenciales para un reactor de fusión (como imanes superconductores, mantenimiento remoto y sistemas para extraer energía del plasma) y la validez de los conceptos de módulos de reproducción de tritio que conducirían a un futuro reactor a tritio autosuficiente.

En el Proyecto ITER participan miles de ingenieros y científicos de distintas nacionalidades, con grandes retos por delante principalmente por su novedad (sobre todo de materiales), por su componente experimental y su envergadura, resultando el calendario del proyecto en varias décadas, con previsión de comenzar a ensamblar el reactor en 2025 e iniciar las pruebas de alta potencia con deuterio y tritio en 2035.

Es probable que la energía nuclear siga siendo una fuente de energía importante en el futuro. Sin embargo, también es probable que su crecimiento sea moderado, debido a los riesgos asociados y a la creciente competencia de otras fuentes de energía renovables, como la energía solar y la eólica.

Igualmente, tenemos referencias del uso de energías renovables, hidráulica, solar y eólica, desde tiempos antiguos.

Las Naciones Unidas define las energías renovables como un tipo de energías derivadas de fuentes naturales que llegan a reponerse más rápido de lo que pueden consumirse. En la actualidad, las energías renovables se clasifican en:

- Hidráulica: se obtiene de la energía cinética y potencial del agua en movimiento cuando se eleva o desciende de forma pronunciada. Consiste en embalsar el agua de lluvia y ríos aprovechando la orografía. Es la fuente de energía renovable más utilizada para generar electricidad.
- Solar: se obtiene a partir del sol en forma de radiación electromagnética, como luz, calor (radiación infrarroja, que represen-

ta más del 50% de la radiación solar recibida) y rayos ultravioletas. El flujo de radiación solar que recibe la Tierra se estima en 1.366 W/m^2 de media, pero en la superficie de la tierra se registran de media unos 1.100 W/m^2 , en función del ángulo de incidencia y la estacionalidad.

- Eólica: se obtiene de la energía cinética del viento, considerando que el viento es una consecuencia meteorológica de la acción del Sol sobre la Tierra, que hace mover grandes cantidades de aire a velocidades muy variadas por la diferencia de temperaturas.
- Geotérmica: se obtiene de la energía térmica disponible en el interior de la Tierra.
- Oceánica: se obtiene de la energía térmica y de la energía cinética del agua de mares y océanos. Se emplea para generar electricidad.
- Bioenergía: se obtiene a partir de diferentes materiales orgánicos, biomasa y desechos de la industria agroalimentaria y forestal, principalmente. Se emplea para generar electricidad y para producir biocombustibles de uso por el sector transporte.

La capacidad global instalada de energías renovables se ha duplicado en la última década, pasando de 1.567 GW en el año 2013 a 3.382 GW en 2022. Ha llegado a registrar una capacidad de generación eléctrica de 3.372 GW en 2022, lo que supone cerca del 41% del mix de generación mundial y un incremento de más del 84% desde el año 2014 para generar electricidad.

La hidráulica, con más del 41%, es la energía renovable con mayor capacidad instalada en 2023. Le sigue la energía solar con más del 31% (fotovoltaica casi el 99%) y la eólica con casi el 27% de la capacidad instalada. La energía oceánica, geotérmica y bioenergía suman

algo menos del 1%. Fuera de la conexión a red se registran en el mundo casi 12 GW de energías renovables, cuyo principal uso es la generación de electricidad para autoconsumo.

Según la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA), las renovables generan casi 14 millones de puestos de trabajo y llegan a cubrir el 28% de la generación global de energía eléctrica, solo la eólica y solar superan el 12%. La Agencia considera que el actual ritmo de instalación de energías renovables es insuficiente para alcanzar los objetivos climáticos, limitar el aumento de temperatura del planeta en 1,5° C, y considera que deberían incorporarse unos 1.000 GW de renovables al año para poder alcanzarlos, considerando que en el 2022 se incorporaron alrededor de 300 GW.

A diferencia de los combustibles fósiles, las fuentes de energía renovable son ilimitadas, presentan una elevada dependencia con relación a la disponibilidad de los recursos, viento, sol, actividad geotérmica, etc. y en ocasiones su disponibilidad no coincide con la curva de demanda. Esta característica, en comparación con el uso de combustibles fósiles y la energía nuclear, presenta un perfil de generación intermitente que conviene analizar y planificar en detalle para asegurar que se satisface la demanda en todo momento.

Si analizamos la eficiencia alcanzada por cada una de las tecnologías de generación eléctrica encontramos diferentes valores en el aprovechamiento de las diversas fuentes de energía que hemos visto.

Las centrales térmicas de carbón más actuales y modernas alcanzan una eficiencia de hasta el 45%. Pero además de la combustión, la tecnología de gasificación de carbón para producir gas de síntesis y generar electricidad presenta algunas ventajas principales. En una central de Gasificación Integrada en Ciclo Combinado (GICC) se alcanza hasta un 50% de eficiencia global, la ventaja medioambiental por el volumen y tipo de contaminantes emitidos, ya que es un proceso que permite eliminar los gases contaminantes con cierta facilidad y a un coste competitivo comparado con otras tecnologías, la diversificación de reservas por la variedad de combustibles que acepta y la posibilidad de producir hidrógeno.

Para generar electricidad a partir de gas natural se utiliza principalmente la tecnología de combustión en turbinas de gas aeroderivadas y estacionarias. Las turbinas de gas aeroderivadas es una tecnología que presenta una rápida respuesta para alcanzar el régimen de operación nominal, vertiendo electricidad a la red rápidamente en las centrales térmicas que se denominan Plantas *Peaker*. Las turbinas de gas estacionarias o industriales son más pesadas y alcanzan mayores eficiencias. La configuración de estas centrales térmicas con turbina de gas puede ser en ciclo abierto, instalando únicamente una o varias turbinas de gas, y en ciclo cerrado o ciclo combinado, instalando una o varias turbinas de gas y una o varias turbinas de vapor, porque aprovechan el calor residual de los gases de escape de las turbinas de gas para generar vapor y accionar las turbinas de vapor. La eficiencia de los ciclos abiertos más modernos es superior al 43% y la de los ciclos combinados más modernos es superior al 63%.

La tecnología hidráulica cuenta con un 90 % de eficiencia en la conversión de energía hidráulica en electricidad. Además, la tecnología hidráulica permite el almacenamiento de energía (posible almacenar gran cantidad), mediante la instalación de centrales hidráulicas reversibles o de bombeo. Este tipo de centrales cuentan con dos tipos de embalses situados a niveles diferentes. Cuando la demanda diaria de energía eléctrica es máxima, estas centrales trabajan como una central hidroeléctrica convencional: el agua cae desde el embalse superior haciendo girar las turbinas y después queda almacenada en el embalse inferior. Durante las horas del día de menor demanda, el agua se bombea al embalse superior para que vuelva a hacer el ciclo productivo. Este tipo de central utiliza los recursos hídricos de una forma más racional.

La generación solar fotovoltaica utiliza las células fotovoltaicas para transformar la energía del Sol en electricidad. En función de los semiconductores y dopajes que se utilicen en la fabricación de las células, es posible aprovechar más o menos energía proporcionada por los fotones que inciden sobre ella. Así, la energía de los fotones que absorbe la célula deberá encontrarse en el espacio de banda del

material absorbente, de lo contrario este exceso de energía recibida no se convertirá en energía útil, para generar electricidad, y únicamente generarán calor, lo que conlleva una pérdida de eficiencia.

Las células de silicio monocristalino alcanzan un rendimiento superior al resto de células de silicio, en torno al 18 – 25%, pero requieren de un mayor tiempo de fabricación y presenta mayores costes. Alternativamente, las células de silicio policristalino implican unos costes de fabricación menores, pero también alcanzan una eficiencia inferior, en torno al 16 – 20%.

En los últimos años se ha intensificado la investigación en el desarrollo de nuevos tipos de células con el objetivo de aumentar la eficiencia fotovoltaica, reducir los costes de fabricación y aumentar su ratio de producción. Destacan las células de película delgada, en inglés *Thin-Film*, utilizando cadmio y telurio, capaces de alcanzar una eficiencia superior al 23%; las células de unión simple a partir de arseniuro de galio, capaces de alcanzar una eficiencia superior al 30%; y las células de unión múltiple a partir de arseniuro de galio o seleniuro de indio, capaces de alcanzar una eficiencia, en laboratorio, en torno al 45 - 50% bajo luz solar concentrada. Asimismo, las células solares en tándem también permiten alcanzar mayores rendimientos, a través del apilamiento monolítico de células con diferentes intervalos de banda, especialmente utilizando un material con el que se está investigando: la perovskita.

En 2023, la NASA ha revelado los resultados de un experimento que llevó a cabo para evaluar el rendimiento y la durabilidad de las células solares de perovskita en la Estación Espacial Internacional (ISS). Probó un absorbedor de perovskita durante un período de 10 meses, con el fin de evaluar su resistencia al vacío, las temperaturas extremas, la radiación y los factores estresantes de luz simultáneamente, con resultados muy positivos.

También se está investigando el desarrollo de paneles solares que emplean nanopartículas con polímeros para lograr células más eficientes y baratas. El panel se basaría en varias capas que no sólo

aprovecharían los diferentes tipos de luz, sino también el espectro infrarrojo. Parece que la NASA ha utilizado esta tecnología multi-unión en sus misiones a Marte.

La teoría aerodinámica desarrollada durante este siglo permite finalmente comprender la naturaleza y el comportamiento de las fuerzas que actuaban alrededor de las palas de las turbinas. En 1927, el físico alemán Albert Betz demostró que ningún sistema eólico podía recuperar más del 60% de la energía cinética contenida en el viento. En la actualidad la tecnología de generación eólica alcanza una eficiencia de entre el 40 y 50%.

El uso de los combustibles fósiles en el futuro dependerá de que logremos utilizarlos de una manera sostenible, desde su explotación en las minas y pozos hasta su utilización en procesos industriales, asegurando bajos niveles de emisiones de gases de efecto invernadero, principalmente para producir electricidad a partir de carbón y gas.

En este sentido, se ha venido desarrollando tecnología específica para eliminar y gestionar el CO₂ presente en los gases de combustión, mediante soluciones de captura, uso y almacenamiento de carbono, en inglés *Carbon Capture, Utilisation and Storage* (CCUS). Esta tecnología se considera como una de las tres medidas posibles para reducir las emisiones de dióxido de carbono, junto con un mayor uso de las energías renovables y un aumento de la eficiencia energética.

La aplicación de estas tecnologías para eliminar el CO₂ en las centrales térmicas de generación eléctrica a partir de carbón y gas, tienen un impacto negativo en la eficiencia total de la central, principalmente por las etapas de regeneración de los absorbentes y/o adsorbentes, mediante la aplicación de calor o presión, por el volumen de gases a mover y por la etapa de compresión del CO₂, que son procesos y etapas donde el consumo energético es elevado. Pueden suponer una penalización de entre el 4 y 12% sobre la eficiencia total de la central térmica.

El empleo de las energías renovables proporciona su mayor aportación a la generación de energía eléctrica, de forma sostenible y con menores emisiones de gases de efecto invernadero en comparación con los combustibles fósiles. Además, en la actualidad es el mejor recurso del que disponemos para impulsar la generación distribuida, o descentralizada, instalando la generación de electricidad cerca de los puntos de consumo, lo que reporta menos pérdidas y una mayor eficiencia al sistema.

El desarrollo de las tecnologías de almacenamiento de energía podría resolver los problemas de intermitencia, disponibilidad y variabilidad que presentan las energías renovables, con una gran dependencia de los factores climáticos que hacen posible su aprovechamiento. El avance en la mejora de esta tecnología y la reducción de sus costes permitiría el despliegue e implantación de las energías renovables.

Entre los sistemas de almacenamiento de energía eléctrica en desarrollo, destacan los de tipo electroquímico (baterías), pero también existen sistemas mecánicos (bombeo aire comprimido, aire líquido, etc.), térmicos, químicos (hidrógeno) y eléctricos (supercapacitores).

El avance de los sistemas de almacenamiento eléctrico con baterías está permitiendo el desarrollo de la movilidad eléctrica, con una industria en crecimiento impulsada principalmente por las actuales políticas de descarbonización. Algunos países y regiones han elaborado leyes que penalizan y limitan la movilidad de vehículos con motor de combustión que utilizan combustibles fósiles, llegando a prohibir su fabricación y venta a partir de una determinada fecha, y a su vez favoreciendo e incentivando la fabricación y uso de vehículos eléctricos.

La electrificación de los procesos y la movilidad, como una de las estrategias para descarbonizar la economía, encuentra en la generación distribuida y las renovables una gran aplicación. Esta estrategia de electrificación, junto con un aumento esperado de la demanda de energía eléctrica, se prevé que aumente la capacidad de generación de renovable de forma muy significativa.

Algunos países que cuentan con una gran cuota de energías renovables en su mix de generación observan algunos problemas en sus redes eléctricas para garantizar la seguridad de suministro y calidad de la energía. A diferencia de las tecnologías de generación a partir de combustibles fósiles, que utilizan generadores síncronos, las energías eólica y solar fotovoltaica utilizan por lo general generadores asíncronos o de inducción que, junto a la naturaleza estocástica de su producción, reporta sobrecargas y variaciones en la frecuencia y tensión de la red.

La instalación de baterías y el desarrollo de redes inteligentes (digitalización y capacidad de gestionar un gran número de datos/señales), se definen como las opciones más prometedoras para facilitar el despliegue y la integración de las renovables, gestionar su producción y asegurar la estabilidad de las redes eléctricas.

Existen casos recientes de países y regiones donde las renovables cubren más de la mitad de la demanda eléctrica. En 2023 Alemania generó un 59,7% de su energía eléctrica a partir de renovables, lo que supone un 7% más que el año anterior, y alcanzando un factor de carga del 57,1%. España generó con renovables un 20% más que en 2022, hasta alcanzar casi el 51% de la energía generada. Portugal estuvo hasta 6 días en 2023 generando toda su electricidad con renovables, llegando a producir más de la energía de la que consumió exportando el excedente a España.

El hidrógeno (H_2) es el elemento más abundante en el universo (ca.90% de la materia visible), y uno de los más abundantes en la Tierra. Pero se encuentra formando parte de otros compuestos, en el aire, agua, hidrocarburos, etc. y para utilizarlo es necesario aislarlo, transportarlo, almacenarlo y dispensarlo de forma que se permita su aplicación.

El hidrógeno no es un recurso energético, pues como he indicado anteriormente no se encuentra aislado en la naturaleza, sino que es preciso producirlo a partir de diferentes compuestos en los que

está presente, como el aire, el agua o combustibles fósiles como el carbón y el gas natural. En este sentido es un portador de energía o vector energético.

En la actualidad se posiciona como un prometedor vector energético, capaz de sustituir el uso de combustibles fósiles en diversos procesos y aplicaciones, especialmente en aquellos sectores que presentan una mayor dificultad para contener sus emisiones de gases de efecto invernadero, como la industria del hierro y el acero, cemento, química, minerales no metálicos, metales no ferrosos y papel. Son industrias intensivas en energía, responsables de aproximadamente el 30% del consumo total de energía primaria y del 40% de emisiones de CO₂. Se conocen como sectores difíciles de abatir, en inglés *hard-to-abate sectors*. En este sentido presenta un gran potencial para jugar un papel clave en la transición energética.

En sustitución de los combustibles fósiles puede ser utilizado en aplicaciones estacionarias, para generar electricidad y calor satisfaciendo las necesidades energéticas de la industria, y en el transporte de vehículos, trenes, barcos y aviones. Para producir energía eléctrica y calor en estas aplicaciones, encontramos procesos electroquímicos de conversión directa de energía mediante la tecnología de pilas de combustible, que presentan un elevado rendimiento de conversión, y procesos de combustión mediante la tecnología de turbinas de gas y motores de combustión.

El desarrollo de toda la cadena de valor del hidrógeno, para asegurar su producción, transporte y aplicación de manera segura y sostenible hacia una transición energética de emisiones cero, se le denomina la “economía del hidrógeno”.

En 2022 la demanda de hidrógeno alcanzó los 95 Mt. Aproximadamente, del total de hidrógeno que se produce en el mundo, el 44% se consume en las refinerías de petróleo, el 36% en la producción de amoníaco, el 15% en la producción de metanol y el 5% en la producción de hierro y acero. Son los principales sectores con demanda de

hidrógeno y su uso, considerando los actuales procesos de producción del hidrógeno que consumen, supone la emisión de más de 900 Mt de CO₂.

Dependiendo del tipo de fuente y técnica utilizada para obtenerlo, se le asocia un color para clasificar a ese tipo de hidrógeno producido. Sin embargo, esta escala de colores no está reconocida por ningún organismo, no es un estándar de la ISO, ni de AENOR, ni de la UNE ni de la IEA. Surgió a finales de la década pasada y es empleada por el sector a nivel global.

El 75% del hidrógeno utilizado se obtiene a partir de gas natural y entre el 15 – 20% a partir de carbón. Esto supone en torno al 6% del gas natural y al 2% del carbón utilizado en el mundo. El hidrógeno gris se obtiene mediante el proceso de reformado de metano con vapor). El hidrógeno marrón se obtiene mediante la gasificación de carbón. Si cualquiera de estos dos procedimientos incorpora además tecnología de CCS, se obtiene hidrógeno azul. El hidrógeno rosa se obtiene mediante energía nuclear. Y el hidrógeno verde es el que se obtiene a partir de la electrólisis del agua mediante energías renovables.

Entre las posibles aplicaciones del hidrógeno verde y azul en la transición energética, con el objetivo de progresar en la descarbonización de la economía, destacan el transporte y la generación de energía eléctrica. Con esta consideración, a partir del H₂ que se produce cada año por el procedimiento tradicional, se viene desarrollando y probando diferente tecnología para ambas aplicaciones, con el objetivo de que esta tecnología esté lista para aprovechar de la forma más eficiente el H₂ verde y azul que se obtenga en el futuro.

El amoníaco (NH₃) y el metanol (CH₃OH) producidos a partir de H₂ verde y azul se posicionan como los combustibles más prometedores para este sector, entre otras cosas porque presentan una mayor densidad energética que el H₂, siendo una ventaja cuando se requiere transportar grandes volúmenes de combustible.

Los combustibles sostenibles para aviación entre los que se encuentra el keroseno sintético producido a partir de H_2 , alcanzan la tecnología con el mayor nivel de desarrollo de entre las soluciones potenciales para descarbonizar el sector. Su empleo aprovechando la tecnología de combustión existente (turbinas aeroderivadas) no parece una barrera para sustituir los combustibles fósiles, sin embargo, todavía presenta unos costes de producción elevados.

La tecnología para generar electricidad a partir de H_2 se encuentra disponible a nivel comercial en la actualidad, existiendo algunos diseños de pila de combustible, motores de combustión interna y turbinas de gas (estacionarias y aeroderivadas) capaces de funcionar con gases enriquecidos en H_2 e incluso con H_2 como único combustible, manteniendo un buen nivel de eficiencia. El uso de H_2 en forma de NH_3 podría ser otra alternativa, como se ha demostrado con éxito en centrales térmicas de carbón (combustible mezcla de amoníaco y carbón) y en turbinas de gas (100% NH_3), reportando además una reducción significativa de las emisiones de CO_2 y NO_x .

El hidrógeno está preparado para desempeñar un papel fundamental a la hora de ayudar a los países en la transición hacia fuentes de energía más limpias, y garantizar un futuro sostenible para el carbón, como podría suceder en China, India e Indonesia. Se estima que para 2050, el hidrógeno podría satisfacer el 14% de la demanda energética mundial.

5. PERSPECTIVA ENERGÉTICA GLOBAL EN EL CORTO Y MEDIO PLAZO

El último informe de perspectiva energética a 2045 publicado por la OPEC en octubre de 2023, establece que la demanda de energía primaria global aumentará un 23% para el año 2045, con previsión de que la economía mundial experimente un crecimiento anual del 3% durante este período. El 30% de este crecimiento de la demanda de energía provendría de países OCDE, mientras que el 70% restante de países no-OCDE.

Este aumento de la demanda de energía global vendrá principalmente motivado por un esperado incremento poblacional. La población mundial es de aproximadamente 8 billones de habitantes y posiblemente alcance los 9,5 billones en el año 2045.

En este análisis a 2045, el petróleo experimentaría un crecimiento anual cercano al 1%, promovido principalmente por el sector transportes e industrial petroquímico, y seguirá representando la mayor fuente de energía primaria utilizada con aproximadamente un 30%. Le seguiría el gas con un 24% de la demanda de energía primaria a 2045, experimentando un crecimiento anual superior al 1%. La nuclear podría llegar a representar el 7%, experimentando un crecimiento anual del 2%. Pero el mayor crecimiento provendría de las renovables con un 7,5% anual, llegando a suponer casi el 12% de la energía primaria a 2045.

Con esta proyección, la OPEC estima una inversión acumulada a 2045 en el sector del petróleo de 11,1 billones de euros en actividades de *upstream*, que corresponde a la evaluación geológica de reservas, exploración y producción. En actividades de *midstream*, correspondiente al transporte de crudo, y *downstream*, correspondiente al refinado, tratamiento, distribución y comercialización, se estiman unas inversiones de 1,2 y 1,7 billones de euros respectivamente.

Según la Agencia Internacional de la Energía la aceleración que experimenta la transición a la energía limpia significa que queda muy poco margen para el crecimiento de los combustibles fósiles, puesto que, por primera vez, la demanda de petróleo, gas natural y carbón alcanza su punto máximo en los tres escenarios considerados en su publicación de referencia *World Energy Outlook 2023* antes de 2030. La participación de los combustibles fósiles en la demanda de energía primaria disminuye del 80% en las últimas dos décadas al 73% en el escenario de políticas declaradas para 2030, al 69% en el escenario de compromisos anunciados y al 62% en el escenario de cero emisiones netas .

Si bien todas las consideraciones hacen indicar una disminución en el uso del carbón, se estima que podría seguir suponiendo la fuente de energía más utilizada para generar electricidad, alcanzando una contribución del 22% en el sector para el año 2040. Su uso estaría relacionado con la instalación de tecnologías CCUS, para limitar la emisión de gases de efecto invernadero que implica su utilización.

El uso del hidrógeno y las tecnologías de captura, utilización y almacenamiento de carbono (CCUS) están logrando avances muy necesarios. La cartera de proyectos muestra que más de 400 GW de electrólisis de hidrógeno y más de 400 millones de toneladas de capacidad de captura de CO₂ compiten por estar operativos en 2030. Este hecho podría hacer cumplir los hitos del escenario de compromisos anunciados, si todos los proyectos planificados siguen adelante, pero el coste de la inflación y los cuellos de botella en la cadena de suministro podrían obstaculizar su progreso.

El Organismo Internacional de Energía Atómica ha aumentado sus proyecciones de crecimiento de la energía nuclear a nivel global por tercer año consecutivo. Según su informe anual de 2023, se prevé que para 2050 la capacidad nuclear instalada sea un 25% mayor de lo estimado en 2020, con un enfoque creciente de varios países en esta fuente de energía para abordar desafíos como la seguridad energética y el cambio climático. En el escenario más optimista, se

espera que la capacidad nuclear se duplique hasta alcanzar 890 GW, mientras que, en el escenario más conservador, aumentaría a los 458 GW.

En la actualidad, la energía eólica y la energía solar juntas generan más del 12% de la electricidad que se consume. Se ha registrado un aumento en la demanda de energía primaria y eléctrica en China, Estados Unidos, Rusia e India. Sin embargo, Europa ha registrado una contracción en la demanda de ambas, y la previsión es que esta tendencia con aumento y disminución de energía primaria y eléctrica se mantenga por estos mismos países durante esta década.

Y es que, debido a este aumento de la demanda, en el año 2022 han coincidido simultáneamente a nivel mundial el récord de energía limpia (considerando ambas, renovables y nuclear) para generar electricidad (ca.39%) y el récord de emisiones de CO₂ generadas por el sector eléctrico.

La industria consume el 38% del total de energía primaria y emite aproximadamente el 47% del total de emisiones de CO₂. En concreto, las industrias intensivas en energía, que son las del hierro y acero, cemento, química, minerales no metálicos, metales no ferrosos y papel, suponen casi el 90% del carbón, más del 70% del petróleo y casi el 55% del gas que demanda toda la industria. Como ya se mencionó anteriormente, se denominan sectores difíciles de abatir. En este sentido, se prevé que el uso del H₂ verde encuentre una elevada demanda como solución para descarbonizar estos sectores, sustituyendo los combustibles fósiles que viene utilizando.

La Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA), considera que debería triplicarse la contribución de energías renovables de aquí a 2030 para poder alcanzar los objetivos climáticos, limitar el aumento de la temperatura del planeta en 1,5°C y conseguir que el sector energético registre cero emisiones en el año 2050. Asegura que ante las cifras que arroja el sector, los planes y políticas actuales se está lejos de alcanzar estos objetivos y que en 2050 el sector podría estar emitiendo unas 16 Gt de CO₂. En este sentido, indica que sería necesario incorporar unos 1.000 GW anuales de renovables a

nivel global, y que las renovables deberían pasar de contribuir con el 28% a la generación de energía eléctrica al 68% en 2030 y al 91% en 2050. En este escenario la eólica y la solar fotovoltaica supondrían cerca del 58% y 32% respectivamente de la nueva capacidad necesaria adicionar.

El IRENA considera que la electricidad supondrá más del 50% del consumo global de energía primaria en el año 2050. Se espera un aumento de la electrificación, especialmente en el sector industrial, transportes y residencial, promovido por una mayor penetración en el uso de las energías renovables y una mejora en las ratios de eficiencia energética.

La perspectiva del IRENA es que las renovables participen con el 68% en el mix de generación en 2030, llegando a alcanzar el 91% en 2050, y que supongan más del 80% del consumo final de energía en 2050. Estima que la producción de H₂ limpio sea de 125 Mt/año en 2030 y supere los 520 Mt/año en 2050. Además, prevé que el despliegue de tecnologías CCUS serán capaces de evitar la emisión de 1,4 GtCO₂/año en 2030, y hasta 3,2 GtCO₂/año en 2050.

Estados Unidos es en la actualidad el mayor productor y exportador de petróleo y gas, y todas las previsiones apuntan a que mantendrá este liderazgo en los próximos años. Entre las renovables la solar fotovoltaica se convertirá en la mayor fuente de generación eléctrica en Estados Unidos.

China ha ido incorporando, a un ritmo sin precedentes, a su mix de generación eléctrica tecnologías con un mínimo impacto de emisiones de gases de efecto invernadero, hidroeléctrica, eólica, solar fotovoltaica y nuclear. En la actualidad cuenta -por mucho- con la mayor capacidad de energía renovable instalada en el mundo, de las tres tecnologías, hidráulica, solar fotovoltaica y eólica (terrestre), además de la mayor capacidad de producción de hidrógeno renovable, las centrales de carbón más modernas y menos contaminantes, y con la mayor capacidad de almacenamiento con baterías instalada y de fabricación de estos equipos.

Según la Agencia Internacional de la Energía , los gobiernos necesitan medidas políticas más firmes en múltiples frentes para aprovechar la oportunidad que ofrece el hidrógeno de bajas emisiones, H₂ verde principalmente. En este sentido, el hidrógeno de bajas emisiones puede ser una oportunidad para que los países impulsen sus economías de cara al futuro, mediante la creación de industrias a lo largo de las cadenas de suministro de las tecnologías del hidrógeno.

En el escenario de políticas declaradas el tamaño del mercado del sector del hidrógeno de bajas emisiones aumenta de 1.400 millones de dólares actuales a 12.000 millones de dólares en 2030, lo que equivale al gasto en energía eólica marina en Europa en 2022. El aumento de las ambiciones en línea con el escenario cero emisiones netas (NZE en inglés) podría ampliar el tamaño del mercado hasta 112 mil millones de dólares, aproximadamente el tamaño del mercado de instalaciones solares fotovoltaicas en tejados en la región de Asia Pacífico en 2022. Sin embargo, existen desafíos en torno a la expansión de la fabricación de tecnología, así como a la creación de demanda y la seguridad proporcionada por la existencia de *off-takers* o compradores (los usuarios del hidrógeno producido con bajas emisiones). Estos desafíos son de esperar en un sector que necesita construir cadenas de valor complejas, pero que se han visto exacerbados por la inflación, la caída de los precios de los combustibles fósiles y la lenta implementación de políticas. Superar estos desafíos requiere que los gobiernos actúen en toda la cadena de valor, o el progreso será desarticulado y conducirá a cancelaciones y retrocesos.

Con relación a las materias primas-minerales críticas para la transición energética, se observa que su demanda se ha duplicado en los últimos 5 años. La Agencia Internacional de la Energía (IEA) espera un aumento de la demanda de minerales críticos a 2030. En este sentido prevé que el cobre podría pasar de casi 6 Mt a más de 12 Mt, el silicio podría experimentar un aumento de su producción del 100% hasta alcanzar los 2 Mt, el litio podría pasar de las 50.000 t actuales a superar las 400.000 t, y las tierras raras podrían aumentar desde 11.000 t a más de 40.000 t.

La Unión Europea ha elaborado la Ley de Materias Primas Fundamentales, para garantizar el suministro y la soberanía de la unión en esta materia. La ley ha sido aprobada en diciembre de 2023, y entre sus objetivos destacan: reducir la burocracia y aumentar el impulso de la innovación y el desarrollo de materiales alternativos, establecer unos ambiciosos objetivos de reciclaje y potenciar las asociaciones estratégicas con terceros países.

Si analizamos los datos macroeconómicos, el estado de ánimo para afrontar el reto de transición energética puede no parecer muy optimista, con una inflación persistente, mayores costos de endeudamiento y elevados niveles de deuda.

En general, el contexto macroeconómico se ha vuelto más difícil debido a las presiones inflacionarias en 2022, lo que marcará el final de una era de capital muy barato y tipos de interés bajos. Muchas de las economías en mercados emergentes y en desarrollo se encuentran particularmente desfavorecidas, por un mayor coste de endeudamiento y crecientes presiones fiscales. Según el Banco Mundial, los ingresos per cápita en 2024 se mantendrán por debajo de los niveles de 2019 en más de un tercio de los países con bajos ingresos.

Antes de la pandemia, la inversión anual en sistemas energéticos era de poco más de 2 billones de dólares, dividida aproximadamente en partes iguales entre combustibles fósiles y energía limpia. Esta última incluye energías renovables, otras fuentes de generación y combustibles de bajas emisiones, así como el gasto en mejorar la eficiencia, la electrificación de uso final, redes y almacenamiento. La estimación de la AIE para 2023 es que se haya alcanzado una inversión total de alrededor de 2,8 billones de dólares en el sector energético. El gasto en combustibles fósiles ha aumentado lentamente después de una fuerte caída registrada en 2020, pero en la actualidad se mantiene aproximadamente en los niveles de inversión donde estaba hace cinco años, por lo que todo el aumento provino de la energía limpia. La tendencia en inversión no parece que vaya a ser uniforme en todas las tecnologías, pero el crecimiento en algu-

nas áreas clave de tecnología en energía limpia, y en particular en la energía solar fotovoltaica, ahora está alineada con los requisitos a corto plazo en el escenario cero emisiones netas para 2050 de la AIE.

Los ámbitos más dinámicos se pueden agrupar bajo el epígrafe de electrificación limpia, respaldado por la inversión en tecnologías de bajas emisiones. En 2022 se registró un crecimiento del 26% en la generación solar. Y se prevé que las adiciones globales anuales de energía renovable para generar electricidad aumenten en más de 500 GW solo en 2023, registrando así el mayor aumento absoluto jamás visto. La proporción de fuentes de generación de bajas emisiones, considerando las energías renovables más la nuclear, alcanzarán en global el 40% en 2023, un nuevo máximo. Dentro de este aumento la energía solar está a la cabeza. La capacidad solar fotovoltaica, tanto a gran escala como a pequeña escala en sistemas distribuidos, representa dos tercios del aumento previsto para 2023, y las adiciones planificadas brindan confianza en que se pueda sostener un alto crecimiento en los próximos años.

Por su parte, la capacidad nuclear registró la incorporación de 8 GW de nueva capacidad, principalmente en China, Finlandia, Corea y Pakistán. Además, muchos gobiernos están analizando de nuevo cómo la energía nuclear podría contribuir a su futuro energético, como lo hicieron después de las crisis de los precios del petróleo en la década de 1970.

China planea incrementar su capacidad nuclear hasta los 70 GW en 2025 y Rusia hasta el 25% de su mix de generación en 2045. Otros países que cuentan con energía nuclear en su mix de generación, como Estados Unidos, Francia, Japón, Corea del Sur e India, consideran y aprovisionan fondos para la construcción de nuevas unidades que conectarán a la red en los próximos años. Y otros países como Polonia y Egipto han lanzado su programa nuclear con la construcción de sus primeras unidades nucleares para generar energía eléctrica.

La electricidad se está expandiendo hacia nuevos usos finales, en particular para proporcionar movilidad y calor. Las ventas mundiales

de vehículos eléctricos aumentaron más del 50% en 2022, alcanzando más de 10 millones, todo un récord. La implementación de almacenamiento eléctrico en baterías a gran escala y en autoconsumo (lo que se conoce en inglés como *behind-the-meter*) creció un 90% en 2022, mientras que las bombas de calor también experimentaron un año récord con un aumento de ventas del 11%, casi duplicando el nivel de ventas de hace cinco años.

Como resultado de la aplicación de las últimas políticas energéticas europeas, observamos una transición en la utilización de unas fuentes de energía hacia a otras en la generación de electricidad. El uso del carbón en el mix de generación ha bajado un 7%, el de la nuclear registra otro descenso del 7%, el del fuel-oil baja un 4% y la hidráulica un 3%, el gas natural no ha experimentado variación, la eólica sube un 10% y la solar un 7%.

La política energética de la Unión Europea (UE) responde a los requerimientos del Acuerdo de París alcanzado en 2015, para dar una respuesta internacional y coordinada al reto de la crisis climática. La UE ratificó el Acuerdo de París en octubre de 2016, lo que permitió su entrada en vigor en noviembre de ese año.

En concreto, la UE demanda a cada Estado miembro la elaboración de un Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030 (PNIEC). Los PNIEC presentados por cada Estado miembro servirán a la Comisión para determinar el grado de cumplimiento conjunto y establecer actuaciones para corregir posibles desvíos. El Reglamento define, a su vez, un proceso iterativo entre la Comisión y los Estados miembros con vistas a la finalización de los Planes en 2029 y su posterior aplicación. Incluye un calendario de actualización de los Planes cada cinco años y establece que los Estados miembros deberán presentar cada dos años informes de progreso (el primero de los cuales se elaborará antes del 15 de marzo de 2023). Finalmente, establece garantías para la continuidad del Plan más allá del 2030 mediante la elaboración de una Estrategia de Bajas Emisiones a Largo Plazo (2050).

El 14 de julio de 2021 la Comisión Europea presentó un paquete legislativo masivo sobre propuestas climáticas y energéticas para poner en marcha el denominado Pacto Verde Europeo, con el objetivo de colocar a la Unión Europea en el camino para alcanzar la neutralidad climática de una manera justa, rentable y competitiva para 2050.

Dentro de este Pacto se define el denominado *Fit for 55*, u “Objetivo 55”, que implica la reducción de las emisiones netas de gases de efecto invernadero en al menos un 55% para 2030, en comparación con los niveles de 1990. Para cumplir esos objetivos, el hidrógeno se presenta como una tecnología clave. Su desarrollo permitirá descarbonizar con éxito las industrias de altas emisiones, el transporte pesado y otros sectores en los que la electrificación no es una opción factible. También posee importantes ventajas logísticas de almacenaje y distribución.

En su interés por liderar la economía del hidrógeno global, la Unión Europea establece la Estrategia Europea del Hidrógeno y el Plan REPowerEU, ambos dentro del *European Green Deal, 2020*. Para contribuir a la implementación de la estrategia del hidrógeno, la Comisión Europea ha lanzado la *Clean Hydrogen Alliance*, con el objetivo de desplegar las tecnologías del hidrógeno renovable y el hidrógeno bajo en carbono para 2030. Establece una serie de hitos específicos a alcanzar en 2025 (6 GW electrolizadores alimentados con energías renovables para producir al menos 1 Mt de H₂ verde), 2030 (40 GW electrolizadores alimentados con energías renovables para producir al menos 10 Mt H₂ verde) y más allá de 2030 (al menos un 25% de la generación renovable se destine a la producción de H₂ verde). En noviembre de 2023 se ha celebrado la primera subasta europea, en modo piloto, de H₂ verde, con un precio objetivo inferior a 4,5 €/kg y ha contado con una dotación de fondos de 800 M€.

Junto con el H₂ limpio, la tecnología CCUS podría suponer una palanca crítica para alcanzar los objetivos de reducción de emisiones en los sectores difíciles de abatir, que vimos anteriormente. El uso del carbono capturado podría también hacer que surjan nuevas oportunidades de negocio.

Según el *Global CCS Institute*, en el mundo hay en operación 29 instalaciones con tecnología CCS con una capacidad de captura que alcanza casi los 40 MtCO₂/año. Para ser consistentes con el objetivo establecido en el Acuerdo de París de no superar 1,5° C, La Unión Europea necesitará capturar entre 230 y 430 MtCO₂/año en 2030. En este sentido, según la Plataforma Zero Emisiones de la Unión Europea, existen en la unión más de 70 proyectos, en diferentes estados de desarrollo, que pretenden estar operativos en 2030.

Los acuerdos establecidos en Dubai durante la COP28, en diciembre de 2023, podrían determinar el futuro energético del planeta, en función del grado de compromiso que los diferentes países y regiones mantengan mediante la aplicación de sus diferentes políticas energéticas y esfuerzos realizados en materia de energía.

Durante esta cumbre el consenso determinó que la transición energética no estaba siendo lo suficientemente rápida, si bien se reconoció la elaboración de planes para un futuro de emisiones cero y una aceleración del cambio hacia las energías limpias. También se propuso una revisión de los países que conforman el Anexo I de la Convención o Tratado (Protocolo de Kioto de 1992), que recoge los países más desarrollados, industrializados o en vías de desarrollo, y máximos responsables del cambio climático, en aplicación del principio de las responsabilidades comunes, norma constitutiva de la política climática global. Su interpretación tradicional sostiene que diferentes niveles de protección ambiental deben esperarse entre los países desarrollados y los países emergentes y/o en vías de desarrollo. Por este motivo, las partes piden que se revise la lista de países del anexo, y que China entre a formar parte de este.

Durante su celebración, Europa ha solicitado que China entre a formar parte de los países desarrollados y más industrializados, como uno de los máximos responsables del aumento de emisiones a nivel global, para que participe en la financiación de las medidas orientadas a mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero a nivel global, responda económicamente para reparar las consecuencias y los daños producidos por el cambio climático en países subdesarro-

llados o en vías de desarrollo, y facilite el desarrollo, la transferencia e implantación de la mejor tecnología para conseguir los objetivos de emisiones cero en otros países.

Algunos de los hitos y acuerdos alcanzados más destacados son:

- 1) Se ha establecido un nuevo objetivo específico a 2030 para triplicar las energías renovables, al menos hasta los 11.000 GW, y duplicar la eficiencia energética.
- 2) Se ha acordado un texto histórico denominado “El Consenso de los Emiratos Árabes Unidos (EAU)”, que establece una ambiciosa agenda climática para mantener el límite de 1,5 °C. El Consenso de los EAU hace un llamamiento a las Partes para que abandonen los combustibles fósiles y alcancen el objetivo de cero emisiones netas. También anima a presentar Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional para el conjunto de la economía.
- 3) Se ha logrado resultados negociados históricos para poner en marcha el concepto de Pérdidas y Daños, asegurando 792 millones de dólares de compromisos tempranos, proporcionando un marco para el Objetivo Global de Adaptación (GGA, por sus siglas en inglés).
- 4) Se ha impulsado la “Agenda de Acción”, que abarca cuatro pilares: acelerar una transición energética justa y ordenada; fijar la financiación climática para hacerla más disponible, asequible y accesible; centrarse en las personas, la naturaleza, las vidas y los medios de subsistencia; y fomentar la plena inclusión en la acción climática. Se han movilizado más de 85.000 millones de dólares para la financiación de esta agenda.
- 5) Dentro de la Agenda de Acción, se ha incluido la Declaración de los EAU sobre agricultura, alimentación y clima, que integra la agricultura y los sistemas alimentarios sostenibles en respuesta al cambio climático.

- 6) Dentro de la Agenda de Acción, se ha incluido el Acelerador Mundial de la Descarbonización (GDA, por sus siglas en inglés), que consiste en una serie de iniciativas energéticas de referencia en los sectores público y privado para acelerar la transición energética.
- 7) Se ha firmado el acuerdo *Oil and Gas Decarbonisation Charter* (OGDC en inglés, o Carta de Descarbonización del Petróleo y Gas), que han firmado 50 de las principales compañías de petróleo y gas, públicas y privadas, que representan más del 40% de la producción global de petróleo, y entre las que se encuentran ADNOC, Saudi Aramco, Equinor, Petronas, OMV, INPEX, ONGC, Enni, ExxonMobile, Shell, TotalEnergies, etc. El propósito es la cooperación entre las compañías que firman la carta, trabajando juntas para alcanzar los objetivos del Acuerdo de París, aumentando la transparencia para desarrollar la tecnología y acelerar la implantación de las mejores prácticas disponibles para reducir colectivamente la intensidad de las emisiones, reducir la pobreza energética y proporcionar energía segura y asequible para apoyar el desarrollo de todas las economías, con la promesa de invertir en los sistemas de energía del futuro, incluyendo renovables, combustibles bajos en carbono y tecnología de emisiones negativas que retiran CO₂ de la atmósfera.
- 8) Se ha firmado por 22 gobiernos la declaración para triplicar la energía nuclear, e incentivar la inclusión de este tipo de energía en las políticas energéticas para 2050.

6. PERSPECTIVA ENERGÉTICA EN ESPAÑA

Hace veinte años el centro de meteorología *Hadley Center* de Estados Unidos, afirmaba que España será uno de los países más perjudicados por el cambio climático en el año 2050, sufrirá un aumento general de las temperaturas de 2,5° C, más acusado en los veranos, las precipitaciones se reducirán en un 10% y la humedad del suelo en un 30%, la práctica totalidad de sus 30.000 km de playas desaparecerán, debido a la elevación del nivel del mar y a procesos erosivos. El cambio climático supondrá más incendios forestales, aumentando la erosión y la desertificación, se registrarán más sequías, inundaciones y fenómenos tormentosos en el área mediterránea, como la gota fría. La producción agrícola disminuirá al igual que los recursos hídricos, disminuyendo su aprovechamiento hidráulico.

En el año 2022, debido a una fuerte sequía y a una menor producción eólica en comparación con el año anterior, la dependencia energética de España se elevó a casi el 70%, siendo aproximadamente un 10% superior al de la Unión Europea. El petróleo supuso casi el 50% de la energía primaria consumida en el país, alcanzando los datos de 2018. Le siguieron el gas natural con el 23%, las energías renovables con el 16,5% y la nuclear con el 12,5%.

El sistema eléctrico español tiene unos 120 GW de potencia instalada. El mix de generación lo compone la energía eólica con aproximadamente el 25% de la capacidad instalada, los ciclos combinados con el 21%, la solar fotovoltaica con el 20%, la hidráulica con el 14,5%, la nuclear con el 6% y la cogeneración con el 4,7% de la capacidad instalada. Las fuentes de energía renovable alcanzan casi el 60% de la capacidad instalada.

Cabe destacar el descenso que viene experimentando la capacidad de cogeneración instalada en nuestro país, una configuración eficiente adoptada por la industria para maximizar la utilidad de los

recursos -combustibles-, al generar electricidad y calor en el mismo punto de consumo, integrando el aprovechamiento de ambas formas de energía.

Con la distribución de capacidad instalada por tecnología que conforma el sistema eléctrico español, el mix de generación eléctrica con el que contribuye cada una de las tecnologías es bien diferente. Así, las energías renovables cubren aproximadamente el 50% de la demanda eléctrica (eólica un 23,5%), la nuclear más del 21% y los ciclos combinados alrededor del 23%. El índice de disponibilidad se sitúa en torno al 98%.

Las interconexiones de España con los países vecinos suelen registrar todos los años los mismos intercambios, importando electricidad de Francia y exportando a Portugal y Marruecos.

Las emisiones específicas de nuestro mix de generación en 2023 han sido de 0,12 tCO₂/MWh, con un total de 32 MtCO₂. Considerando el año 2019, antes de la pandemia del COVID-19 y la guerra de Ucrania, este valor era de 0,19 tCO₂/MWh. En este sentido España ha sido capaz de reducir las emisiones específicas un 3,6% en cuatro años. En 2007, este factor de emisión específica era de 0,39 tCO₂/MWh, y las emisiones totales ascendían a 111,3 MtCO₂.

Entonces, podemos afirmar que se ha llevado a cabo una transformación radical de nuestro mix de generación en 16 años, si bien la demanda en los últimos diez años ha reducido un 10% hasta los 230 GWh en 2023. A la vista de lo que se ha logrado, no parecería descabellado fijarse el objetivo de alcanzar la neutralidad de carbono de nuestro mix de generación en 2040, es decir, un sistema eléctrico cero emisiones.

Sin embargo, este reto podría ser complicado si queremos mantener el alto nivel de seguridad de suministro de nuestro mix de generación. En el 2007 menos de un 20% de nuestra producción era renovable, y en 2023 hemos alcanzado casi el 51%. A medida que aumentamos la participación de renovables en nuestro mix de generación, tenemos la necesidad de asegurar el suministro dando

la potencia necesaria en cada instante, con la calidad de energía eléctrica esperada y resolviendo las restricciones técnicas de la red eléctrica. Previsiblemente, será necesaria la contribución de los ciclos combinados y la energía nuclear, al menos hasta que se instale el almacenamiento necesario y se digitalice la red para gestionar la nueva composición del sistema eléctrico con mayor porcentaje de renovables.

El marco de la política energética y climática en España está determinado por la Unión Europea, que a su vez responde a los requerimientos del Acuerdo de París alcanzado en 2015 para dar una respuesta internacional y coordinada al reto de la crisis climática.

En este sentido, el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) 2021 – 2030, redactado por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) en enero del 2020, establece el marco en el que se viene desarrollando la política energética del país. Su objetivo es facilitar y actualizar el cumplimiento de los principales objetivos vinculantes para la UE en 2030 y que se recogen a continuación:

- 23% de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero respecto a 1990.
- 32% de renovables sobre el consumo total de energía final bruta.
- 32,5% de mejora de la eficiencia energética.
- 15% interconexión eléctrica de los Estados miembros.

Estos objetivos fueron los establecidos en el Plan inicial, pero posteriormente se han actualizado algunas de estas cifras, como el objetivo de reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero respecto a 1990, pasando del 23 al 32%, incrementando el peso de las renovables sobre el consumo total de energía final que asciende al 48% -alcanzando un 81% de la electricidad- y mejorando la eficiencia energética hasta el 44%.

Para el año 2030, se espera tener instalados 62 GW de eólica, 76 GW de fotovoltaica, 4,8 GW de solar termoeléctrica, 1,4 GW de biomasa y 22 GW de almacenamiento.

Además, se ha incrementado la ambición de objetivos como rehabilitar 1,38 millones de viviendas, frente a 1,2 millones, o disponer de un parque de vehículos eléctricos de 5,5 millones. Y se han introducido metas nuevas, en coherencia con los nuevos objetivos europeos, como consumir un 73 % de energía renovable en los edificios, alcanzar 11 GW de electrolizadores para producir hidrógeno verde, o disponer de 19 GW de autoconsumo.

Y el borrador de actualización del Plan prevé subir en 10 puntos porcentuales la producción de energía autóctona, alcanzando el 49 %, lo que proporcionaría un ahorro superior a los 90.000 millones de euros en importaciones de combustibles fósiles durante todo el período.

Con relación al impacto socioeconómico, el MITECO estima la movilización de una inversión de 294.000 millones, de los que un 85 % será privada y un 15 % será pública (un 11 % de fondos europeos). El 40 % de la inversión recalará en energías renovables, el 29 % en ahorro y eficiencia, el 18 % en redes energéticas y un 12 % en la electrificación de la economía, que debería alcanzar el 34 % en 2030.

En línea con la Ley Europea de Materias Primas Fundamentales, aprobada en diciembre de 2023, España ha establecido la Hoja de Ruta para la gestión sostenible de materias primas minerales, para reforzar la autonomía estratégica del país y la seguridad de abastecimiento de suministros clave para la transición energética y el desarrollo digital.

Esta Hoja de Ruta contempla cuatro orientaciones estratégicas:

- 1) Busca la eficiencia y la economía circular en las cadenas de valor del suministro de materias primas minerales, integrando y concretando para la industria extractiva los objetivos y líneas de actuación de la Estrategia España Circular 2030.

- 2) Plantea una oportunidad para impulsar y consolidar la gestión sostenible de las materias primas minerales en la industria extractiva española.
- 3) Pone el foco en garantizar la seguridad de suministro y el cumplimiento de los requisitos medioambientales, geoestratégicos y de justicia social en la importación de materias primas minerales.
- 4) Fomentar la industria de materias primas minerales de carácter estratégico para la transición energética y digital, por su empleo masivo en la implantación de energías renovables, baterías para vehículos eléctricos o almacenamiento a medio y largo plazo de energía, alineándose con las políticas europeas de acceso a los recursos y sostenibilidad.

En 2020 lanza la Estrategia Nacional del Hidrógeno, y establece la Hoja de Ruta, alineándose con las directivas e iniciativas europeas y el PNIEC 2021 - 2030. En este sentido, la Hoja de Ruta establece para 2030 una serie de objetivos, entre los que destacan tener en operación al menos 4 GW de electrolizadores para producir H₂ verde (en revisión, podría ascender a 11 GW), un 20% del H₂ consumido en el país sea de origen renovable, tener instaladas entre 100 y 150 hidrogenas de acceso público, disponer de 5.000 – 7.500 vehículos de pila de combustible (FCEV) ligeros y pesados para transporte de mercancías, contar con dos líneas comerciales de trenes propulsados con H₂, alcanzar 8.900 M€ de inversión en proyectos de producción de H₂ renovable y reducir las emisiones en 4,6 MtCO₂.

En general, las perspectivas energéticas en España son positivas a medio y largo plazo, aunque a corto plazo se enfrenta a desafíos como la actual crisis energética global y la necesidad de reducir la dependencia de los combustibles fósiles, principalmente gas y petróleo.

A medio y largo plazo, España tiene un gran potencial para la generación de energía renovable, gracias a sus recursos solares, eólicos

e hidráulicos. El objetivo de España es alcanzar el 74% de energía renovable en el consumo final de energía en 2030, lo que supondría un aumento significativo de aproximadamente el 40% actual.

Para alcanzar este objetivo, España está impulsando el desarrollo de nuevos proyectos de energía renovable, tanto en tierra como en mar. En el caso de la energía solar, España tiene una de las mayores potencias instaladas de energía solar fotovoltaica en Europa. En el caso de la energía eólica, España es uno de los principales productores de energía eólica en el mundo.

La transición a un modelo energético más sostenible también conlleva el desafío de reducir la dependencia de los combustibles fósiles. En 2022, España importó el 69,1% de la energía que consumió. La reducción de esta dependencia pasa por el desarrollo de energías renovables, la eficiencia energética y la diversificación de las fuentes de suministro.

En el corto plazo, España se enfrenta a la crisis energética actual, causada por el aumento de los precios de la energía, especialmente del gas natural. Esta crisis está teniendo un impacto negativo en la economía española, provocando un aumento de la inflación y la ralentización del crecimiento económico.

En general, las perspectivas energéticas en España son positivas, pero a corto plazo se enfrentan a desafíos que deberán abordarse para garantizar la seguridad energética del país y la transición a un modelo energético más sostenible.

Algunos de los principales retos que se plantean para el sector energético en España son los siguientes:

- Reducción de la dependencia energética exterior. España debe reducir su dependencia de los combustibles fósiles importados, especialmente del gas natural. Para ello, es necesario impulsar el desarrollo de energías renovables y la eficiencia energética.

- Estabilización de los precios de la energía, son volátiles y pueden tener un impacto negativo en la economía. Es necesario establecer mecanismos para estabilizar los precios y evitar que se produzcan situaciones como la crisis energética actual.
- Integración de las energías renovables. La integración de las energías renovables en el sistema eléctrico es un reto técnico y operativo. Es necesario desarrollar nuevos sistemas de gestión del sistema eléctrico para garantizar la seguridad de suministro y la estabilidad de la red.
- Desarrollo de la economía circular. El sector energético es un importante consumidor de recursos naturales. Es necesario promover la economía circular para reducir el impacto ambiental del sector.

A finales del año 2023, Red Eléctrica (REDEIA Corporación), el operador del sistema eléctrico español, reconoce que depende de la seguridad de suministro depende de las centrales de gas (ciclos combinados), y alerta del riesgo de apagones hasta el 2030 pese al fuerte ritmo de instalación de energías renovables. El país afronta un gran riesgo de cobertura de la demanda si se cierran aproximadamente 9 GW de ciclos combinados y si el ritmo de puesta en marcha de las instalaciones de almacenamiento no logra cumplirse.

Tras analizar un análisis nacional de cobertura del Sistema Eléctrico Peninsular Español, reconoce que estará en situación precaria si se desmantelan las plantas de gas, e incluso si se mantienen los ciclos abiertos esta situación podría agravarse de no cumplirse con la capacidad de almacenamiento planificada a partir del 2027, fecha en la que está previsto se inicie el desmantelamiento de la capacidad nuclear.

En enero de 2024, el presidente anunció algunas prioridades con relación al sistema de transmisión de energía, como son el refuerzo de la red eléctrica para acelerar la electrificación de la economía, nuevos mecanismos de apoyo a la descarbonización de las industrias y a proyectos verdes estratégicos, un impulso de la “financiación ver-

de” para apoyar la inversión en energías renovables y tecnologías verdes, y la aspiración de ampliar los fondos NextGen de la Unión Europea más allá de 2026.

7. CONCLUSIONES

En un mundo en constante evolución, la energía sigue siendo el pilar fundamental que impulsa el progreso y el desarrollo.

En la actualidad podemos afirmar que somos capaces de aprovechar con una mayor eficiencia la energía contenida en los combustibles fósiles para generar electricidad y para desplazarnos, en comparación a cuando utilizamos fuentes de energía renovable. Sin embargo, vemos que su uso sin control implica una serie de penalizaciones que debemos valorar, como la sobreexplotación de recursos limitados, la contaminación del aire y efluentes, y unos costes económicos y sociales que pueden perjudicar a las generaciones futuras.

La utilización de fuentes de energía renovable presenta una elevada dependencia con la intermitente disponibilidad del recurso, lo que dificulta establecer una correcta planificación temporal para satisfacer la demanda y las necesidades energéticas de la sociedad en cada momento.

Por otro lado, se confirma un avance muy positivo en la tecnología y los sistemas de almacenamiento de energía eléctrica, lo que permitirá aumentar la planificación y la seguridad de suministro energético de los sistemas de energía renovable, para disponer de energía eléctrica a demanda, y facilitará un mayor uso y aprovechamiento de estos recursos de energía de una forma más sostenible.

Se apuesta definitivamente por las energías renovables, su despliegue y penetración en el sistema energético y mix de generación global parece imparable. En este sentido, existen experiencias recientes de países que han conseguido durante varios días, sin reportar problemas en la red, mantener un sistema eléctrico 100% renovable.

La energía solar fotovoltaica se posiciona como la energía renovable con perspectivas de experimentar el mayor crecimiento de capaci-

dad global instalada para satisfacer la creciente demanda esperada en 2050. Además, esta tecnología es fácilmente escalable y de tipo *plug-and-play*, lo que simplifica el diseño y la ejecución de proyectos de este tipo, siempre que se mantenga un buen control de la cadena de suministro.

El final de los combustibles fósiles para generar electricidad podría no alcanzarse en 2050, las tecnologías CCUS jugarán un papel importante en desarrollo de algunas economías que dependen del carbón.

Es muy posible que asistamos un aumento de la producción de petróleo de aquí a 2050 para la fabricación de plásticos, principalmente, pues se prevé un aumento de la demanda de estos productos.

La energía nuclear de fisión seguirá manteniendo una posición de referencia en la generación de energía eléctrica de base, asegurando el suministro y calidad de la energía ante una falta de recursos renovables. Previsiblemente aumente su capacidad global a 2050 y posiblemente con nueva tecnología, reactores de nueva generación que generan menos residuos y operan con un mayor nivel de seguridad.

El hidrógeno limpio afianza su posición como vector energético, con un aumento previsto de su producción a partir de energías renovables (principalmente solar fotovoltaica), podría desplazar al gas natural en el mix de generación global y a los combustibles fósiles en los sectores difíciles de abatir.

La conversión de carbón en hidrógeno representa una aplicación innovadora de las tecnologías de reducción de emisiones de CO₂. Al mismo tiempo, ayuda a las naciones dependientes del carbón a lograr sus objetivos de desarrollo y ambiciones de descarbonización.

La energía solar fotovoltaica, el hidrógeno limpio y la energía nuclear se posicionan como las fuentes de energía del futuro para desarrollar la carrera espacial, explorar el espacio y permitir que la humanidad se establezca en otros planetas.

No se han encontrado suficientes iniciativas, pocas políticas, estímulos e interés en impulsar la valoración energética de residuos y basura (más del 55% de la basura acaba en vertederos), con potencial de desarrollo y un importante contenido energético. En este sentido, parece haber recorrido para su desarrollo y posibilidad de crecimiento.

Como ya he indicado anteriormente, y después de analizar el panorama energético actual, parece que tenemos por delante grandes retos a los que tendrá que enfrentarse la humanidad para cambiar el actual modelo económico y social, que presenta una gran dependencia de los combustibles fósiles, asumiendo que estos son limitados.

En este sentido, la transición energética, que se vislumbra necesaria, conllevará ciertos cambios de hábitos, algunos de ellos muy profundos, en los modelos de consumo de la sociedad actual, y afectará al empleo, profesiones, sistema fiscal, legislación, la forma en cómo nos relacionamos, etc. y forzará a realizar una revisión de los planteamientos que hacemos en medicina, filosofía y otras ramas del saber, la política y la legislación de las próximas décadas.

Será necesario acometer con detalle y conocimiento la transición energética -cuarta revolución- para que sea un acierto, un verdadero avance para la mayoría de las personas, mejore la calidad de vida y prosperidad de la humanidad, al mismo tiempo que asegure la conservación del planeta.

He dicho

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Oller, J.A. Mecánica Cuántica. Departamento de Física. Universidad de Murcia.
- [2] Col·legi Oficial d'Enginyeria Informàtica de Catalunya. Breve Introducción a la Mecánica Cuántica. Situación de la Mecánica Cuántica dentro de las Teorías Físicas. Cataluña.
- [3] ODS 13 Acción por el Clima. Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Naciones Unidas, 2015.
- [4] Tratado de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. New York, 1992.
- [5] Watson, R.T; L.G. Meira Filho; E. Sanhueza; A. Janetos. "Climate Change 1992: The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment. Chapter 6 – Section A1. Greenhouse Gases: Sources and Sinks". IPCC. Cambridge University Press, Great Britain, 1992.
- [6] IPCC, 2023: Sections. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 2023.
- [7] Muntean, M., Guizzardi, D., Schaaf, E., Crippa, M., Solazzo, E., Olivier, J.G.J., Vignati, E. Fossil CO₂ emissions of all world countries. Expansión, Datos Macro, Energía y Medio Ambiente, Emisiones CO₂, 2022.
- [8] Papa Francisco. *Laudate Deum*, 2ª Carta Encíclica. La Santa Sede, Ciudad del Vaticano, Italia, 4 octubre 2023.
- [9] Ortiz, A. La seguridad energética de China: geopolítica y transición energética. Instituto Español de Estudios Estratégicos. Madrid, 23 octubre 2023.
- [10] La política energética: principios generales. Fichas temáticas sobre la Unión Europea. Parlamento Europeo. (La política energética: principios generales | Fichas temáticas sobre la Unión Europea | Parlamento Europeo (europa.eu)).

- [11] Guerrero, F.; C. Clemente-Jul. “Key Factors to develop a common methodology towards an appropriate energy mix for electricity generation.” CEST2013. Atenas (Grecia), 2013.
- [12] Consejo Mundial de la Energía. “World Energy Trilema. Time to get real – the time for sustainable energy policy.” World Energy Council. Londres, Inglaterra, 2012.
- [13] World Energy Outlook 2012. International Energy Agency.
- [14] Jessica, J. “The IEA Model of Short-term Energy Security (MOSES). Primary Energy Sources and Secondary Fuels.” Working Paper. Agencia Internacional de la Energía, París, Francia, 2011.
- [15] Consejo Mundial de la Energía. “2013 World Energy Issues Monitor.” World Energy Agency, Londres, Inglaterra, 2013.
- [16] Consejo Mundial de la Energía. “2015 World Energy Issues Monitor. Energy price volatility: the new normal.” World Energy Council, Londres, Inglaterra, 2015.
- [17] Schwab, K. “La cuarta revolución industrial”. Foro Económico Mundial. ISBN 978-84-9992-694-0. Noviembre, 2016.
- [18] World Energy Outlook 2023. International Energy Agency.
- [19] Green House Gas Emissions from Energy Data Explorer. International Energy Agency, 2023.
- [20] World Oil Outlook 2045. OPEC, October 2023.
- [21] Coal 2022. International Energy Agency, December 2022.
- [22] State of the Art: CCS Technologies 2023. Technical Report. Global CCS Institute. Melbourne, Australia, July 2023.
- [23] International Energy Outlook 2023. US Energy Information Administration, October 2023.
- [24] Guerrero, F. “Observatorio al Mercado Nuclear Mundial”. Ponencia en el Ilustre Colegio Oficial y la Asociación de Químicos de Madrid – ANQUE, Sección Técnica de Ingeniería Química. Madrid, 16 abril 2015.
- [25] El Marco Jurídico de las Salvaguardias. El OIEA y el Tratado sobre la No proliferación. International Atomic Energy Agency, 2024.

- [26] Power Reactor Information System Database (PRIS). International Atomic Energy Agency. December 2023.
- [27] Panorama energético y energía nuclear a octubre de 2023. Sociedad Nuclear Española (SNE). Noviembre 2023.
- [28] Lozano, M. “Nucleares, ¿por qué no? Cómo afrontar el futuro de la energía nuclear”. ISBN 978-84-9908-240-0. Abril, 2010.
- [29] Nuclear Power Reactors: Fast Reactors. International Atomic Energy Agency. January 2024.
- [30] Características y ventajas de los reactores modulares pequeños (SMR). Foro Nuclear. España, 24 de junio de 2020.
- [31] Fusión nuclear. Monografías. Consejo de Seguridad Nuclear. España. Enero 2024.
- [32] Página oficial del Proyecto ITER (www.iter.org)
- [33] IRENA (2023), Renewable energy statistics 2023, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- [34] IRENA (2023), World Energy Transitions Outlook 2023: 1.5°C Pathway, Volume 1, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- [35] Origen e historia de la energía hidráulica. Energía Hidráulica. Sistema Español de Información sobre el Agua (Hispagua). España. Junio 207.
- [36] Artículo Renovables: “La capacidad hidroeléctrica mundial creció 34 GW en 2022, algo que no se veía desde hace seis años”. El Periódico de la Energía. 8 de junio de 2023.
- [37] Iberdrola. Innovación. Células fotovoltaicas. 2023.
- [38] Photovoltaic Research. Best Research-Cell Efficiency Chart. National Renewable Energy Laboratory (NREL). U.S. Department of Energy (DOE). 2023.
- [39] EU Market Outlook for Solar Power 2023 – 2027. Solar Power Europe. December 2023.
- [40] Global Wind Report 2023. Global Wind Energy Council (GWEC). 27 March 2023.

- [41] Global Wind Workforce Outlook 2023 – 2027. Global Wind Energy Council (GWEC). October 2023.
- [42] Linares, J.I.; B. Moratilla. “El hidrógeno y la energía”. Colección: Avances de Ingeniería. Análisis de situación y prospectiva de nuevas tecnologías. Asociación Nacional de Ingenieros del ICAI y Universidad Pontificia Comillas. ISBN 978-84-932772-9-1. 2007.
- [43] Global Hydrogen Review 2023. International Energy Agency (IEA). September 2023.
- [44] McWilliam, B., G. Sgaravatti, S. Tagliapietra and G. Zachmann (2024). “Europe’s under-the-radar industrial policy: intervention in electricity pricing”, Policy Brief 01/2024, Bruegel.
- [45] EY Energy and Resources Transition Acceleration. “If every energy transition is different, which course will accelerate yours?”. Ernst & Young (EY) 2023.
- [46] Energy Transition Outlook 2022 – 2050. Det Norske Veritas (DNV), 2022.
- [47] Energy Industry Insights 2023. Trilemma and Transition, the Momentum to Break Barriers. Det Norske Veritas (DNV), 2023.
- [48] Global Energy Perspective 2023. McKinsey & Company. November 2023.
- [49] Sector nuclear en el mundo. Sociedad Nuclear Española. Octubre 2023.
- [50] El futuro energético global: reflexiones de Vaclav Smil en el 20 aniversario de la Fundación Innovación Bankinter. Madrid, 19 de octubre de 2023.
- [51] Carbon Capture Usage and Storage: A Vision to Establish a Competitive Market. UK Department for Energy Security & Net Zero. National Archives UK Government. Open Government Licence, December 2023.
- [52] Carbon Capture Usage and Storage: Delivery Plan Update 2023. The Carbon Capture and Storage Association (CCSA). UK, September 2023.

- [53] Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021 – 2030. Ministerio para la Transición Ecológica y Reto Demográfico. Gobierno de España. 20 de enero 2020.
- [54] Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia. Gobierno de España. 28 de junio de 2023.

DISCURSO DE CONTESTACIÓN
DE LA
EXCMA. SRA. DRA. DÑA. BEATRIZ YOLANDA
MORATILLA ORIA

Excelentísimo Sr. Presidente de la Real Academia de Doctores de España

Excelentísimos Señoras y Señores Académicos

Señoras y Señores

La Real Academia de Doctores de España recibe en este acto solemne a un nuevo miembro de número, la Dra. Dña. María del Carmen Clemente Jul, que viene a ocupar la Medalla Nº 5 que dejó vacante por su fallecimiento el Dr. D. Benjamín Fernández Rubio, Ilustre Académico y Catedrático Emérito de la Universidad Complutense de Madrid.

Felicito y agradezco a la Dra. Clemente por el brillante discurso que nos ha dictado sobre la energía del futuro a partir de su experiencia en el desarrollo de tecnologías limpias en la generación de energía. La Dra. Clemente cuenta con una vocación universitaria de investigación tecnológica e industrial muy definida, como así lo demuestra su amplio currículum.

Toda su vida académica ha estado vinculada a la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía de la Universidad Politécnica de Madrid, en la que comenzó su actividad docente e investigadora como profesora adjunta interina hasta la actualidad, como Catedrática Emérita, siempre relacionada con el ámbito de la energía y los combustibles.

En ese ámbito empezó a formarse durante la realización de su Tesis Doctoral en la Junta de Energía Nuclear, donde comenzó a investigar como supervisora de instalaciones radiactivas, becada por el Instituto de Estudios Nucleares al finalizar su carrera de Licenciada en Ciencias Químicas, en la Universidad Complutense de Madrid.

Su director de Tesis fue el Dr. Antonio Travesi Jiménez, a quien considera un gran maestro en energía nuclear. Como consecuencia de la realización de su Tesis Doctoral, fue nombrada por la Agencia Internacional de Energía Atómica representante de España en el programa de aplicaciones de la energía nuclear para sus usos pacíficos. Tras su incorporación a la Universidad Politécnica de Madrid, comienza su trabajo de investigación en el desarrollo de tecnologías limpias de combustión y de gasificación, siendo la directora técnica y de calidad del Laboratorio de Ensayos Químicos Industriales de Combustibles, acreditado por ENAC, laboratorio creado por el ilustre académico, Catedrático Emérito Dr. D. Emilio Llorente Gómez.

Los resultados de su actividad investigadora han sido difundidos en las revistas más relevantes del ámbito energético y presentados en ponencias en los principales congresos mundiales, a cuyos comités organizadores y de investigación ha pertenecido.

Sus líneas de investigación han abarcado desde las tecnologías limpias de combustión y gasificación, hasta la captura y almacenamiento y usos de CO₂. En la actualidad su línea de investigación se centra en el hidrógeno como vector energético.

Internacionalmente, la Dra. Clemente es experta evaluadora en los programas marco de la Unión Europea, desde sus inicios en el programa CECA hasta la actualidad en el programa de energía de bajo contenido en carbono.

En su discurso de toma de posesión manifiesta que las perspectivas energéticas de nuestro país, en el marco de los objetivos de transición energética que marcan las directivas europeas, se orientan hacia una reducción significativa del uso de los combustibles fósiles, tanto en la generación de energía eléctrica como en el transporte, en aumentar la electrificación de su economía, en reducir la dependencia energética y en garantizar la calidad de suministro.

A finales de 2023, la consultora internacional *Ernst & Young* (EY) afirma que el coste nivelado de la energía de la solar fotovoltaica es un 29% más bajo comparado con la alternativa más barata de gene-

ración a partir de combustibles fósiles. La consultora indica que a nivel global el LCOE de la solar fotovoltaica estaba en 417 USD/MWh hacia el año 2100, y en 2022 registraba unos 49 USD/MWh, lo que supone una disminución del 88%. La eólica terrestre registra una caída de aproximadamente el 66% para el mismo período, pasando de los 102 a 35 USD/MWh.

EY estima que para 2030 ambas energías renovables, solar fotovoltaica y eólica, representarán el 38% del mix de generación, alcanzando una cuota del 62% en el 2050. China, Estados Unidos y la Unión Europea impulsarán un aumento del 53% en la generación solar y eólica, hasta registrar más de un 57% de la producción solar y eólica mundial en 2050.

También afirma que la solar fotovoltaica se convertirá en la mayor fuente de generación eléctrica en Estados Unidos. No obstante, el despliegue de la solar fotovoltaica está encontrando importantes barreras en este país. El retraso en las solicitudes de interconexión de redes está provocando retrasos, cancelaciones y grandes costos. Estados Unidos tiene al menos 1.350 GW de capacidad eólica y solar, y unos 680 GW de almacenamiento están esperando ser conectados, lo que debería ser suficiente para duplicar el suministro eléctrico del país.

Según los últimos estudios de la *Det Norske Veritas* (DNV), fundación noruega dedicada a la seguridad marítima, el cambio climático y toda la cadena de valor de la energía, el LCOE de la solar fotovoltaica podría alcanzar los 21 €/MWh en el 2050. Si bien en la actualidad, finales del 2023, en determinadas regiones el LCOE de la solar fotovoltaica ya se está aproximando a este valor.

El *Carbon Capture and Storage Association* del Reino Unido, revela en uno de sus últimos informes que el Reino Unido está avanzando en la incorporación de tecnologías CCS, contando con 90 proyectos de este tipo, contando con una capacidad de captura de 50 MtCO₂/año en 2035. Estos proyectos cuentan con el respaldo del gobierno británico, que hasta finales de 2023 los ha apoyado con una inversión de más de 20 mil millones de libras. Se prevé que la implanta-

ción de esta tecnología consiga la creación de más de 70.000 nuevos empleos y mantenga los aproximadamente 77.000 que existen en el sector.

El Departamento de Seguridad Energética y Cero Emisiones del gobierno del Reino Unido, considera que la tecnología CCS jugará un papel decisivo en la transición energética del país. Pretende establecer un mercado CCUS comercial y competitivo, con el objetivo de hacer del Reino Unido un líder mundial en CCUS, creando un sector sostenible que respalde miles de empleos y reduzca las emisiones para garantizar un mejor medio ambiente para las generaciones futuras.

En este sentido, España presenta un alto potencial en el desarrollo de energías renovables, especialmente solar fotovoltaica y eólica, con una elevada disponibilidad de estos recursos renovables que contribuirán de una manera decisiva al mix energético del país.

No obstante, alcanzar un alto grado de participación de las energías renovables en su mix de generación presentan ciertos retos, como la necesidad de reforzar la red, para acelerar la electrificación de la economía, y aumentar la capacidad de almacenamiento de energía, para amortiguar la intermitente disponibilidad de la generación renovable y satisfacer la demanda energética del país.

Pone de manifiesto que, para poder construir en España una planificación energética sostenible, a corto plazo existe el riesgo de sufrir apagones y pueden presentarse dificultades para mantener la garantía de suministro eléctrico. Ante esta situación, surge la necesidad de conservar abiertas las centrales térmicas de gas -ciclos combinados- y las centrales nucleares, manteniendo su aportación como carga base y generación de respaldo con una respuesta rápida.

Reflexiona acerca del uso sostenible que se hace de las diferentes fuentes de energía y de la eficiencia que se consigue con cada tecnología. La industria consume el 38% del total de energía primaria y emite aproximadamente el 47% del total de emisiones de CO₂. En concreto, las industrias intensivas en energía, que son las del hie-

rro y acero, cemento, química, minerales no metálicos, metales no ferrosos y papel, suponen casi el 90% del carbón, más del 70% del petróleo y casi el 55% del gas que demanda toda la industria. Como ya se mencionó anteriormente, se denominan sectores difíciles de abatir. En este sentido, se prevé que el uso del H₂ verde encuentre una elevada demanda como solución para descarbonizar estos sectores, sustituyendo los combustibles fósiles que viene utilizando.

Además, identifica, la energía nuclear, la solar fotovoltaica y el hidrógeno, por sus características y procesos de producción, almacenamiento, gestión y uso, como las principales fuentes de energía en las que podría apoyarse la humanidad para desarrollar la carrera espacial y la conquista del espacio.

La Medalla Nº5 que le va a ser impuesta, así como el diploma que le va a ser entregado, le dará disposición a su plaza de Académica de Número. Le expreso nuestro placer, puesto que ha sido recibida con gran afecto y respeto, así como con la esperanza por su colaboración en la Academia para poder construir un futuro energético sostenible y seguro en España.

He dicho.

