

Energía y Telecomunicaciones

Energías Renovables

Apuntes de la Asignatura

Jesús Mirapeix Serrano

Grupo de Ingeniería Fotónica
Universidad de Cantabria



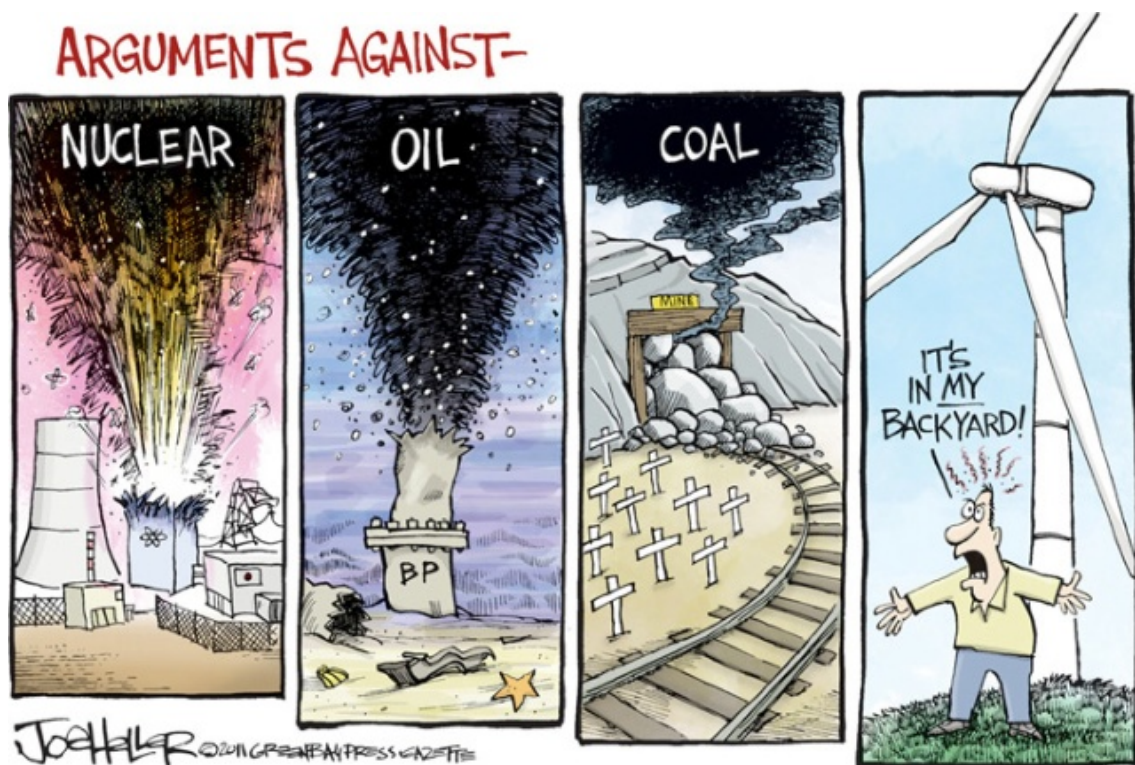


Image by Joe Heller: Heller Syndication, ©2016 (Free for classroom use.)

Solving the clean energy problem is an essential part of building a better world. We won't be able to make meaningful progress on other challenges – like educating or connecting the world – without secure energy and a stable climate. Yet progress towards a sustainable energy system is too slow, and the current system doesn't encourage the kind of innovation that will get us there faster.

Mark Zuckerberg, on joining Bill Gates to launch the *Breakthrough Energy Coalition* to invest in new clean energy technologies (30 November, 2015)

Energía y Telecomunicaciones

Mirapeix Serrano, Jesús

© 2023 Jesús Mirapeix Serrano.

Esta obra está disponible bajo licencia Creative Commons.

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Universidad de Cantabria

39005 Santander

ENERGÍA Y TELECOMUNICACIONES

ENERGÍAS RENOVABLES

Resumen

EN esta parte de la asignatura se va a realizar una introducción a las energías renovables, comenzando por una presentación de aspectos clave que han llevado al desarrollo de este tipo de fuentes de energía, analizando el contexto actual a nivel mundial, europeo y nacional, y siguiendo con una búsqueda de la relación que existe entre este campo de conocimiento y las telecomunicaciones.

Si esta presentación formal no te ha convencido, míralo de esta forma: hablaremos del agotamiento de los combustibles fósiles, de Trump y el cambio climático, de las primas a las renovables y de aerogeneradores que “estallan”.

En partes sucesivas se presentarán de manera breve las «otras» fuentes de energía renovable, ya que este curso se centrará fundamentalmente en la energía solar fotovoltaica, tratando también de manera menos extensa la energía eólica.

Los **objetivos fundamentales** de esta parte de la asignatura son los siguientes:

- Conocer conceptos fundamentales relacionados con las energías renovables (tales como cambio climático, desarrollo sostenible, descarbonización, garantía de capacidad, almacenamiento de energía en la red eléctrica, generación distribuida, etc.)
- Conocer la situación actual de las EERR en el mundo, en Europa y en España
- Entender (y saber aprovechar) la relación existente con las telecomunicaciones

ENERGÍA Y TELECOMUNICACIONES

ENERGÍAS RENOVABLES

Estructura del Curso

Este curso se ha dividido en 4 partes dedicadas a una introducción a las energías renovables (y conceptos asociados), energía solar (incluyendo energía solar térmica y fotovoltaica) y energía eólica. El último capítulo está dedicado a revisar brevemente los conceptos fundamentales de otras energías renovables, como la hidráulica, biomasa, energías derivadas del mar, etc.

▷ **Capítulo 1: Introducción a las Energías Renovables**

El objetivo es que el estudiante se familiarice con los conceptos básicos sobre Energías Renovables. Esto incluye el comprender las razones que motivan el nacimiento y desarrollo de estas tecnologías, con un especial énfasis en el cambio climático. Resulta fundamental también conocer el panorama actual de estas tecnologías a nivel global, europeo y en España. ¿Qué país es líder en energía fotovoltaica o eólica? ¿Cómo han evolucionado las energías renovables en China en los últimos años? Además, se prestará especial atención a las tecnologías de almacenamiento de energía en la red eléctrica, así como a la relación existente entre energías renovables y telecomunicaciones.

▷ **Capítulo 2: Energía Solar**

La energía solar puede ser dividida entre térmica y fotovoltaica. La energía solar térmica será brevemente revisada, mencionándose tanto instalaciones solares térmicas convencionales (y su diseño), como plantas de concentración o CSP (Concentrating Solar Power), donde la energía del Sol es transformada en calor y, posteriormente, en electricidad. La energía solar fotovoltaica (FV) constituirá el principal tema de este curso, dada su relevancia para los ingenieros de telecomunicación. Los fundamentos y aspectos prácticos de la energía solar FV serán estudiados e instalaciones aisladas y conectadas a red serán analizadas.

▷ **Capítulo 3: Energía Eólica**

La energía eólica es una tecnología madura, con varios parques instalados en España. Aunque probablemente desde un punto de vista distinto (comunicaciones y sensores), esta tecnología está también asociada con las telecomunicaciones. Los aspectos fundamentales relacionados con los aerogeneradores, así como la estructura de una turbina moderna y las tendencias actuales en el sector serán analizadas en este capítulo.

▷ **Capítulo 4: Otras Energías Renovables**

Las energías hidráulica, de la biomasa, geotérmica o derivadas de los mares/oceános serán brevemente analizadas en este capítulo. Se estudiará la relevancia (a nivel mundial) de la producción hidro-eléctrica y los fundamentos básicos de las energías geotérmica

y de la biomasa. Finalmente, se comentarán algunos aspectos básicos relativos a las energías derivadas del mar.

Acrónimos

BTS	Base Transceiver Station	IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change / [Panel Intergubernamental para el Cambio Climático]
CAES	Compressed Air Energy Storage / [Almacenamiento de Energía por Aire Comprimido]	IR	Infrared / [Infrarrojo]
CSP	Concentrating Solar Power / [Energía Solar de Concentración]	LCOE	Levelized Cost of Energy / [Coste Normalizado de la Energía]
E	Energy / [Energía]	PV	Photovoltaics
EBT	Estación Base de Telefonía	RE	Renewable Energy
EERR	Energías Renovables	REE	Red Eléctrica Española
EU	European Union	SHM	Structural Health Monitoring
FBG	Fiber Bragg Grating (red de difracción)	TFC	Total Final Consumption / [Consumo Final Total]
FV	Fotovoltaica	TPES	Total Primary Energy Supply / [Suministro Total de Energía Primaria]
GH	Green-house / [Efecto Invernadero]	UE	Unión Europea
GHG	Green-house Gas [Gas de Efecto Invernadero]	UV	Ultraviolet / [Ultravioleta]
IDAE	Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía		

Glosario

Biomasa es un término que se refiere a la obtención de energía mediante la combustión de madera u otras materias orgánicas similares. La combustión de biomasa implica la emisión de carbono, pero se considera una energía renovable en la UE y la ONU ya que las plantaciones se pueden considerar renovables al ser replantadas. Como fuente de energía, la biomasa se puede usar directamente mediante combustión o de forma indirecta mediante su conversión a bio-combustibles.

Calibración Dinámica de Líneas de Alta Tensión se refiere a la posibilidad de transmitir corrientes superiores a las nominales de la línea mediante la medida de parámetros tales como la radiación solar o la velocidad del viento, lo que permite estimar su posible efecto refrigerante sobre la línea.

Combustibles Fósiles son combustibles creados en procesos naturales, tales como la descomposición anaeróbica de organismos muertos que contienen energía generada en su momento por medio de la fotosíntesis. Ejemplos de combustibles fósiles son el petróleo, el carbón y el gas natural.

Concentrating Solar Power / Energía Solar de Concentración (también denominada *Concentrated Solar Thermal*, y CSP) son sistemas de energía solar basados en el uso de conjuntos de espejos para concentrar la radiación solar en un área pequeña. La electricidad se genera mediante la conversión de la luz concentrada a calor, lo que sirve para accionar una turbina conectada a un generador eléctrico.

Desarrollo Sostenible Desarrollo que contempla las necesidades de las generaciones actuales sin comprometer las necesidades de generaciones futuras.

Efecto Fotoeléctrico se refiere a la emisión de electrones que se produce cuando determinados materiales son expuestos a radiaciones electromagnéticas específicas.

Energía Hidráulica / Hydro Power es la energía derivada del agua (saltos de agua o corrientes).

Energía Hidráulica de Bombeo se basa en el movimiento del agua a embalses en altura, donde la energía potencial del agua será recuperada cuando se deje “caer” del embalse superior a uno inferior, activando una turbina en el proceso.

Energía Renovable es la energía obtenida de fuentes de energía que pueden considerarse continuas o inagotables a escala humana.

Energía Solar Fotovoltaica está basada en la conversión de la radiación solar (fotones) en electricidad (electrones) por medio del efecto fotoeléctrico.

Energía Sostenible es la energía que no disminuye de manera notable con un uso continuo, no implica emisiones contaminantes u otros riesgos medioambientales significativos y no implica la perdurabilidad de riesgos para la salud o injusticias sociales.

Energía Primaria es la energía directamente obtenida de fuentes naturales.

Energía de Uso Final es la energía consumida directamente por el usuario, como la electricidad, la gasolina o el gas natural.

Gas de Efecto Invernadero / Greenhouse Gas gas atmosférico capaz de atrapar o reflejar calor (radiación infrarroja). Ejemplos de estos gases son el CO₂ o el metano.

Instalación Solar Fotovoltaica de Autoconsumo instalación diseñada para suministrar electricidad a un sistema/infraestructura/edificio en el cual se encuentra instalada, por ejemplo una vivienda unifamiliar.

Instalación Solar Fotovoltaica Conectada a Red es una instalación que funciona como una planta de generación, produciendo electricidad e inyectándola en la red eléctrica.

Levelized Cost of Energy (LCOE) / Coste Normalizado de la Energía es un parámetro que permite la comparación directa entre diferentes tecnologías (de generación de electricidad), ya que mide las costes a lo largo de la vida útil de una determinada central/instalación (construcción, mantenimiento, operación, etc.) dividido por la energía que dicha infraestructura generará en todos sus años de funcionamiento. Sus unidades son \$/Wh.

Paridad de Red / Grid Parity ocurre cuando una nueva fuente de energía es capaz de generar electricidad a un coste normalizado (LCOE) igual o menor que el coste asociado a la compra de electricidad en la red eléctrica tradicional. El término “paridad de red” se emplea fundamentalmente asociado a las energías renovables.

Términos en Inglés

Biofuels Bio-Combustibles

Capacity Potencia Instalada

Coal Carbón

Co-generation Co-generación

Combined Cycle Ciclo Combinado

Hydro Hidráulica

Mtoe: Million Tonnes of Oil Equivalent Tonelada equivalente de petróleo (millones)

Natural Gas Gas Natural

Ocean Energy Energías derivadas del Mar

Oil Petróleo

Pumped Hydro Hidráulica de Bombeo

Solar PV Solar Fotovoltaica

Thermal RE Térmica Renovable

Waste Residuos

Wind Eólica

Unidades

°C	Celsius (temperatura)
J	Joule (energía)
K	Kelvin (temperatura)
Mtoe	Million Tonnes of Oil Equivalent (millones de toneladas equivalentes de petróleo)
ppm	Parts per million (partes or millón)
ppb	Parts per billion (partes or billón)
ppt	Parts per trillion (partes or trillón)
Wh	Watt-hour (vatio-hora) (energía)
W	Watt (vatio) (potencia)(capacity)

Índice general

Acrónimos	I
Glosario	II
Términos en Inglés	IV
Unidades	V
Índice general	VI
1 Introducción	1
1.1 Energía: Primaria y de Uso Final	1
1.2 Energía: Renovable y Sostenible	4
1.3 Energías Renovables: Tecnologías	6
1.4 Potencia Instalada vs. Energía (Electricidad) Generada	9
1.5 ¿Por qué surgen las EERR?	13
1.5.1 Agotamiento de los Combustibles Fósiles	13
1.5.2 Dependencia Energética (Seguridad en el Suministro de Energía) . . .	17
1.5.3 Desarrollo Sostenible	17
1.5.4 Demanda Energética	18
1.6 Cambio Climático	20
1.6.1 Cambio Climático: El Efecto Invernadero	21
1.6.2 Cambio Climático: <i>Feedbacks</i> Positivos y Negativos	24
1.6.3 <i>Feedbacks</i> Positivos	24
1.6.4 <i>Feedbacks</i> Negativos	25
1.6.5 Cambio Climático: Gases de Efecto Invernadero	26
1.6.6 Cambio Climático: Variación de la Temperatura Global y sus Causas .	27

1.6.7	Cambio Climático: Predicciones para el Siglo XXI	28
1.6.8	Cambio Climático: Argumentos de los Escépticos	29
1.6.9	Cambio Climático: Conclusiones	31
1.7	Panorama Actual: EERR en el contexto mundial	34
1.8	Situación actual de las EERR: contexto europeo	40
1.9	Panorama Actual: EERR en España	41
1.9.1	ESPAÑA 2019-2022: ¡un nuevo escenario!	44
1.9.2	Panorama Actual: Conclusiones	44
1.10	EERR: Políticas	46
1.10.1	“Primas” a las EERR	48
1.10.2	Funcionamiento del Mercado Eléctrico en España	50
1.11	EERR: Almacenamiento de Energía en la Red Eléctrica	52
1.12	Telecomunicaciones y EERR	60
1.12.1	Alimentación de sistemas de telecomunicaciones	60
1.12.2	I+D	61
1.12.3	Sensórica aplicada a infraestructuras renovables	62
1.12.4	Sensores de Fibras Ópticas: FBGs (Fiber Bragg Gratings)	65
1.12.5	Sensores Distribuidos de Fibras Ópticas: <i>scattering</i> de Brillouin y Raman	66
1.12.6	Calibrado dinámico de líneas de alta tensión	70
1.12.7	EERR y Telecomunicaciones: Conclusiones	71
1.12.8	Introducción a las EERR: Conclusiones	72
1.13	ANEXO: Centrales eléctricas en España (a fecha 2021)	72

CAPÍTULO 1

Introducción

1.1. Energía: Primaria y de Uso Final

Antes de adentrarnos en el concepto de **Energía Renovable**, puede ser interesante tanto “refrescar” el concepto de energía como explicar los diferentes tipos de energía que deben ser considerados.

La RAE define «Energía» como:

“Capacidad para realizar un trabajo. Se mide en julios. (Símb. E).”

Importante 1.1: Definición: Energía

Quizás convenga recordar el concepto de **energía** más allá de la definición anterior. Ese **trabajo** al que se hace referencia suele definirse como la **aplicación de una fuerza a lo largo de una determinada distancia**.

Importante 1.2: Energía: unidades

La fuerza se mide en **Newtons (N)** según el Sistema Internacional, siendo $N = kg \cdot m/s^2$. Como el trabajo, o la energía, se define como la fuerza-distancia, la unidad de energía será N·m que, como seguramente sabes, también se denomina **Julio (J)**. Así, si aplicar una fuerza de 1 N a lo largo de 1 m requerirá una energía de 1 J. Como veremos algo más adelante, la energía suele expresarse también en vatios·hora (**W·h**).

Cuestión 1.1: Energía: unidades [300 XP]

Hay dos formas de energía que serán aprovechadas en algunas tecnologías renovables: la **energía cinética** y la **energía potencial**. Las expresiones asociadas a ambas son:

Energía cinética: $\frac{1}{2}mv^2$

Energía potencial: mgh

Partiendo de estas expresiones, demuestra que las **unidades** resultantes son las asociadas a energía. Menciona algún ejemplo donde la energía cinética y la energía potencial se usen para generar electricidad, por ejemplo mediante alguna tecnología renovable.

Cuando hablamos de **energía**, por ejemplo en el contexto de las energías renovables, podemos cometer el error de confundir los términos y pensar que siempre estamos hablando de **energía eléctrica**. Efectivamente, los parques eólicos o los grandes huertos fotovoltaicos están pensados para la generación de energía eléctrica, pero la energía solar térmica puede basarse únicamente en la generación de calor, por ejemplo para calentar el agua caliente sanitaria de una vivienda. Además, en el uso de los combustibles fósiles como fuente de energía no siempre existirá generación eléctrica.

Tabla 1.1. Formas de energía, fórmulas y aplicaciones asociadas.

Forma de energía	Fórmula	Aplicaciones
Potencial gravitatoria	mgh	Hidráulica, mareas
Cinética	$\frac{1}{2}mv^2$	Eólica, corrientes marinas
Fotones/luz	$h\nu$	Solar
Química	$H - TS$	Combustibles fósiles, biomasa
Térmica	$c_p m \Delta T$	Geotermia, motores térmicos
Potencial eléctrico	qV	Baterías
Masa (nuclear)	mc^2	Fisión y fusión

Como vemos de hecho en la tabla anterior, podemos hablar de diferentes tipos de energía que estarán asociadas a diferentes aplicaciones. Todo esto nos lleva al concepto de **energía primaria**:

Energía Primaria es la energía que se obtiene directamente de recursos naturales¹. **Combustibles** (fuels) y **flujos de energía** (flows) son las dos fuentes de energía primaria. En el primer caso estaremos hablando de petróleo, carbón o gas natural; mientras que en el segundo caso hablaremos de viento, radiación solar o flujo de agua, asociados con las energías eólica, solar e hidráulica, respectivamente.

Tal y como se muestra en la **Figura 1²³**. Otros (*Other*) se refiere a energía geotérmica, solar, eólica, etc. Las implicaciones de esta figura son relevantes, ya que los combustibles fósiles están asociados a emisiones de CO₂ y contaminación, si bien ambos

¹Source: <https://bit.ly/2B0Bh66>

²La energía se ha expresado en EJ (Exajulios = $1E18$ J).

³**¡IMPORTANTE!** Todos los datos que aparecen en los apuntes están actualizados a los últimos disponibles. El hecho de que los datos se refieran a 2018 se debe a la dificultad que tienen las organizaciones internacionales de procesar la información de energía primaria a nivel mundial.

Share of world total energy supply by source, 1973 and 2019

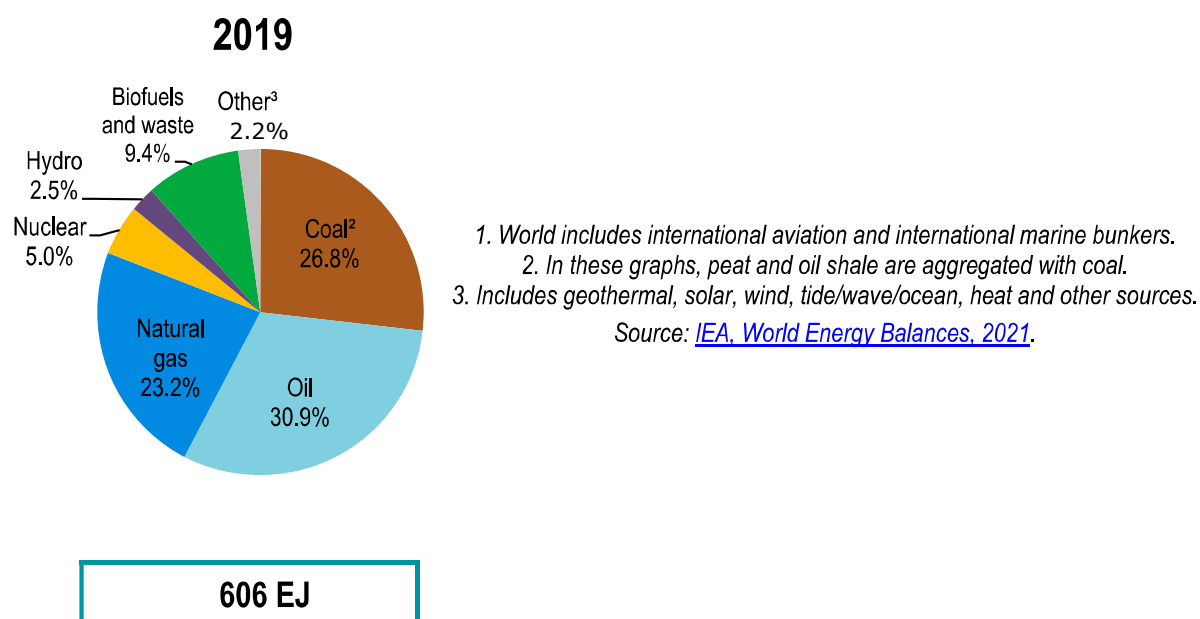


Figura 1. Contribuciones a la demanda de energía primaria global (2019). Fuente: Key world energy statistics 2021. Enlace: <https://bit.ly/3IU3nTQ>

(combustibles y flujos) pueden ser **sostenibles**. Un matiz importante es que sólo estos flujos pueden ser **renovables**.

Todas las fuentes de energía primaria de un determinado país o región contribuyen a lo que se denomina **TPES (total primary energy supply)**. Estas fuentes necesitan normalmente un proceso de conversión antes de que puedan ser usadas. Así por ejemplo, una refinería convierte el crudo en combustibles “secundarios” como la gasolina, el diesel o el queroseno. El carbón se usa en centrales térmicas para generar electricidad. El viento es “recogido” por aerogeneradores para generar también electricidad.

Si nos fijamos en el esquema representado en la [Figura 2](#), será necesario definir también la energía de uso final (*end-use energy*).

Energía de Uso Final / End-Use Energy es la energía consumida por el usuario, como electricidad, gasolina o gas natural.

Un buen ejemplo para aclarar esta diferencia entre energía primaria y de uso final es la electricidad. La energía primaria puede ser en este caso carbón, por ejemplo, mientras que la energía de uso-final será la electricidad consumida. Asumiendo una eficiencia de una central estándar de un 33 %, esto implica que 3 veces más carbón será empleado para la generación de esa electricidad asociada.

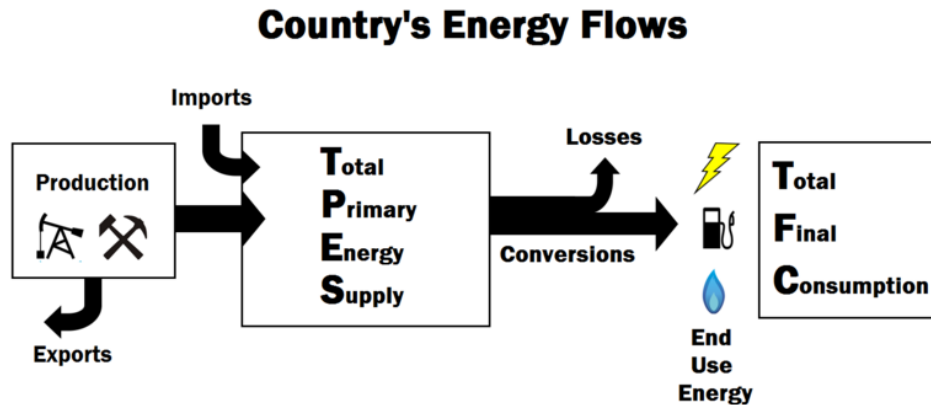


Figura 2. Representación esquemática del flujo de energía en un país: de energía primaria a energía “de uso final” (*end-use energy*). Fuente: Energy Education. Licencia: CC-by-SA 3.0. <http://bit.ly/2B0Bh66>

Importante 1.3: Energía Primaria y Electricidad

En este curso será fundamental saber diferenciar correctamente energía primaria y electricidad, especialmente cuando hablemos de energías renovables (EERR). Por ejemplo, las energías renovables contribuyen en España con un $\approx 40\%$ de la generación eléctrica, pero sólo con un $\approx 12\%$ de los TPES.

Cuestión 1.2: Energía Primaria y Energía Eléctrica [300 XP]

Un dato interesante: ¿Sabrías estimar el tanto por ciento de energía primaria que, a escala mundial, es convertida a energía eléctrica? Trata de encontrar este dato por medio de alguna fuente fiable.

1.2. Energía: Renovable y Sostenible

Energías Renovables y Sostenibles son términos usados habitualmente hoy en día, pero conviene definirlos claramente para evitar posibles malentendidos a lo largo del curso.

Antes de continuar leyendo trata de realizar el siguiente ejercicio: ¿Cómo crees que debería continuar la siguiente frase?:

“Se denomina energía renovable a la energía que. . .”

Una posible definición de **energía renovable** podría ser la siguiente:

“Se denomina energía renovable a la energía que se obtiene de fuentes naturales virtualmente inagotables, ya sea por la inmensa cantidad de energía que contienen, o porque son capaces de regenerarse por medios naturales.”

Definiciones alternativas (más académicas):



Figura 3. Vapor emitido por la central geotérmica en Nesjavellir (Islandia). (Imagen de dominio público realizada por Gretar Ivarsson)

Energy obtained from the continuous or repetitive currents of energy recurring in the natural environment (Twidell and Weir, 1986)

Energy flows which are replenished at the same rate as they are “used” (Sorensen, 2000)

¿Qué conceptos aparecen en la definición?: **fuentes naturales, virtualmente inagotables y regeneración natural**. Veamos por último otra definición de energía renovable (y de energía no-renovable) que incluye un nuevo concepto:

- **Energía Renovable:** Energía obtenida de flujos de energía naturales y continuos (repetitivos) que se producen en nuestro entorno
- **Energía No-Renovable (*Brown Energy*):** Energía obtenida de almacenamientos estáticos de energía que permanecen “ocultos” salvo por la acción del hombre

En estas definiciones aparece claramente un nuevo concepto: las fuentes de energía renovable están ahí, en nuestro entorno y a nuestro alcance: lo único que tenemos que hacer es “recolectarlas”. Por contra, las fuentes de energía no-renovable (pensemos en los combustibles fósiles, por ejemplo), exigen la acción del hombre para su obtención, ya que están “ocultas”.

Ahora que ya tenemos más claro el concepto de energías renovables, podemos identificar sin lugar a dudas la central de la [Figura 3](#) como “no renovable”.

¡Espera un momento! ¿Has leído el pie de la figura? ¡Se trata de una **central geotérmica**! Y la geotermia, como veremos en el siguiente tema, es una energía renovable. De hecho, en algunos países europeos como Islandia, es una fuente de energía clave. Conviene, por lo tanto, desterrar algunos tópicos y pensar que las EERR no van a estar exclusivamente vinculadas a aerogeneradores o paneles solares fotovoltaicos.

Tras revisar el concepto de EERR, puede resultar conveniente introducir el concepto de “sostenibilidad” por medio de la **energía sostenible**, que se entiende como el tipo de energía que:

- No disminuye de manera notable con un uso continuado
- No implica emisiones contaminantes significativas u otros riesgos medioambientales
- No implica la perpetuación de riesgos para la salud o de injusticias sociales

Vemos que aparecen nuevos conceptos que, aunque intuitivamente suelen asociarse a las EERR, desde el punto de vista formal no tienen por qué contemplarse, como que no impliquen emisiones u otros riesgos mediomambientales significativos.

1.3. Energías Renovables: Tecnologías

Cuando se habla de EERR, rápidamente surgen ejemplos como la energía eólica o la solar fotovoltaica, sin embargo, existen otras fuentes de EERR con una importancia muy significativa, en algunos casos incluso superior a las mencionadas en, por ejemplo, la contribución a la generación eléctrica en muchos países. Veamos brevemente qué tecnologías **alternativas** a los combustibles fósiles existen, incluyendo a las EERR:

Energía Hidráulica basada en almacenar agua del cauce de un río tras una presa y forzar el paso del agua a través de una turbina que generará electricidad por medio de un generador.

Energía eólica basada en aprovechar la velocidad (energía) del viento para mover el rotor de un aerogenerador y generar electricidad por medio de un generador

Energía solar fotovoltaica que se aprovecha del efecto fotoeléctrico para convertir la radiación solar en electricidad por medio de paneles FV

Energía solar térmica que puede usarse para generar calor (por ejemplo para el agua caliente sanitaria de viviendas) o electricidad mediante grandes instalaciones donde la energía del Sol se usa para calentar un fluido con el que se activará una turbina y, finalmente, un generador

Biomasa la quema de madera se utiliza para generar electricidad mediante el clásico esquema de turbina-generador.

Biocombustibles que se obtienen de mezclas de diferentes sustancias orgánicas, empleándose por ejemplo como carburantes para transporte

Fisión nuclear se basa en obtener un suministro de elementos radiactivos cuya fisión (separación) produce calor que puede usarse para generar electricidad por medio de una turbina y un generador

Fusión nuclear proceso por el que se genera energía en las estrellas que pretende replicarse por medio de reactores de fusión, donde partiendo de hidrógeno (átomos ligeros) se puede llegar a generar helio, produciendo una gran cantidad de energía en el proceso que puede usarse para generar electricidad por medio de una turbina y un generador

Geotermia se basa en captar el calor del interior de la Tierra para uso directo de ese calor o para generar electricidad en grandes plantas

Energía mareomotriz se basa en utilizar las mareas para activar turbinas o usar presas al estilo de la energía hidráulica

Energía undimotriz aprovechamiento del movimiento de las olas para generar electricidad por medio de diferentes mecanismos, como boyas

OTEC (Ocean Thermal Energy Conversion) donde se saca provecho de la diferencia de temperatura del agua del mar a diferentes profundidades para generar vapor, activar una turbina y generar electricidad por medio de un generador

Cabe destacar que dentro de estas energías o tecnologías, algunas **no pueden considerarse como renovables**, en particular la **energía nuclear (de fisión)**. Por otro lado, la **biomasa** (y también los biocombustibles) implican **emisiones** de gases de efecto invernadero, por ejemplo CO₂, a la atmósfera.

Importante 1.4: Energías alternativas y renovables

Por aclarar los conceptos, una **energía alternativa** es aquella que no se basa en los combustibles fósiles, mientras que una **energía renovable** es aquella cuya fuente (por ejemplo el Sol) no se agota a medida que es usada, al menos no a escala humana.

En España, el **IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía)** es el encargado de las políticas relacionadas con las EERR. El objetivo genérico del IDAE es:

“dar apoyo a las tecnologías orientadas a la descarbonización de la generación eléctrica”

¿Qué es la **descarbonización**? Significa, no sólo abandonar el carbón como fuente de energía, sino en general el uso de combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural) en favor de la implantación de EERR con el objetivo de disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero (hablaremos sobre este tema más adelante).

El IDAE fija los objetivos de cobertura por parte de las EERR en relación a la demanda tanto al consumo final bruto de energía como de energía eléctrica, partiendo de la normativa y directrices europeas. Para el periodo 2010-2020, las tecnologías renovables consideradas por el IDAE son:

No es objeto de esta parte de la asignatura el entrar a analizar en detalle las diferentes tecnologías no renovables. Sin embargo, a modo de ejemplo se presentan cuatro centrales “convencionales” de generación en la figura siguiente:



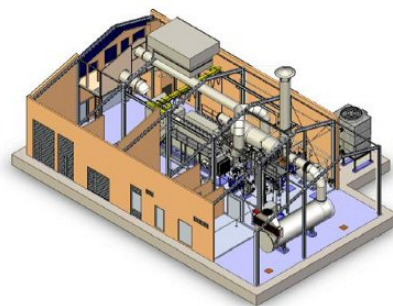
Térmica convencional



Nuclear



Ciclo Combinado



Co-generación

Figura 4. Ejemplos de centrales de generación mediante tecnologías no renovables.

Una central térmica convencional emplea diferentes combustibles (carbón, fueloil, gas natural o combinaciones) para generar electricidad mediante un ciclo termodinámico agua-vapor (turbina de vapor).

Una central nuclear genera energía eléctrica empleando como combustible material fisible (susceptible de realizar el proceso de fisión nuclear) como uranio o plutonio. En el proceso lo que se busca es generar calor para producir el movimiento de alternadores mediante un ciclo termodinámico convencional (turbina de vapor). En la fisión nuclear un átomo pesado se descompone o “rompe” en átomos más ligeros, liberando energía en el proceso.

En una central de ciclo combinado la electricidad se genera mediante la energía térmica del combustible que es transformada en electricidad mediante dos ciclos termodinámicos: el correspondiente a una turbina de gas, generalmente gas natural, mediante combustión y el convencional de agua/turbina de vapor.

En una central de cogeneración se obtiene simultáneamente energía eléctrica y energía térmica útil (vapor, agua caliente sanitaria). Una ventaja de la cogeneración es su mayor eficiencia energética, ya que se aprovecha tanto el calor como la energía mecánica o eléctrica de un único proceso.

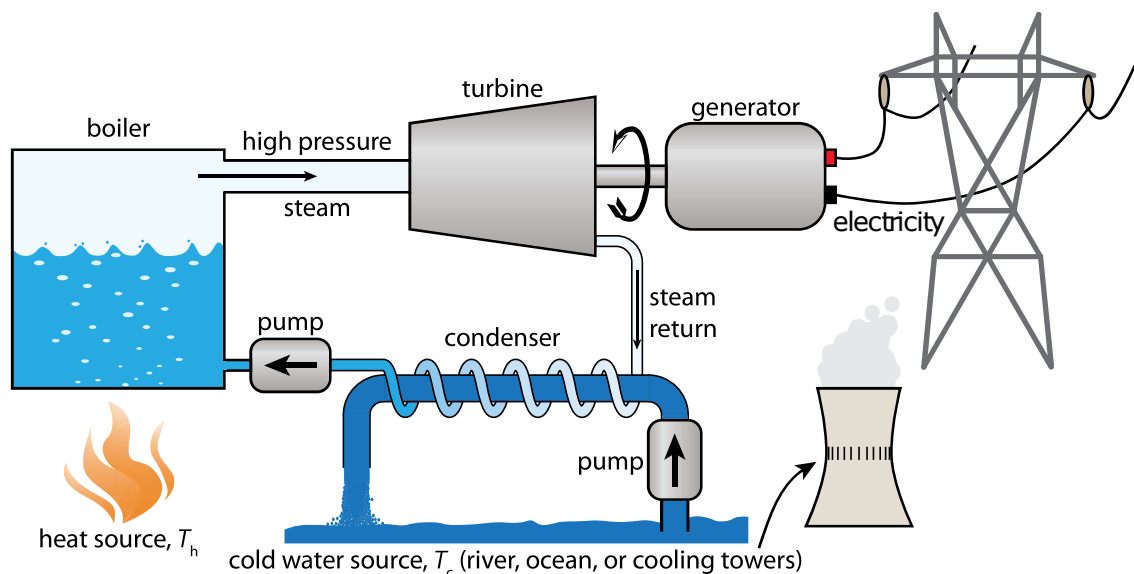


Figura 5. Esquema de funcionamiento de una planta de generación eléctrica genérica. Fuente: “Energy and human ambitions on a finite planet” (Thomas W. Murphy). Licencia: CC-by-NC 4.0. Enlace: <https://bit.ly/3d0Rg9N>.

Cuestión 1.3: Central de generación eléctrica [400 XP]

En la Figura 5 se ha representado el esquema de funcionamiento de una planta de generación eléctrica genérica. Explica brevemente su funcionamiento con tus propias palabras. Indica en qué tipos de plantas renovables o no-renovables se emplea este esquema.

1.4. Potencia Instalada vs. Energía (Electricidad) Generada

Vamos a adelantarnos a la sección de “Panorama Actual” y vamos a hacer un primer análisis de la **potencia (nominal) instalada** en España en función del tipo de tecnología empleada, teniendo en cuenta fuentes de energía tanto renovables como no-renovables. En la Figura 6 se muestra la evolución de la potencia instalada (para generación eléctrica) en los últimos años en España, mientras que en la Figura 7 se muestra la potencia instalada¹ en **España a 31 de diciembre del 2021**. Puede apreciarse como la energía **eólica** aparece en primer lugar (**25,7 %**), seguida por el **ciclo combinado (22,8 %)**, la **hidráulica (15,9 %)** y la **solar fotovoltaica (13,7 %)**, que ha aumentado de manera muy significativa su participación en nuestro país en los últimos años.

Si ahora nos fijamos en la Figura 8, estos nuevos datos parecen contradecir en cierta medida a los anteriores, ya que ahora la tecnología que aparece en primera posición es la eólica, con un 23,3 %, pero es seguida muy de cerca por la **energía nuclear (20,8 %)**. Es

¹Es habitual usar también el término “capacidad” para referirse a la potencia instalada.

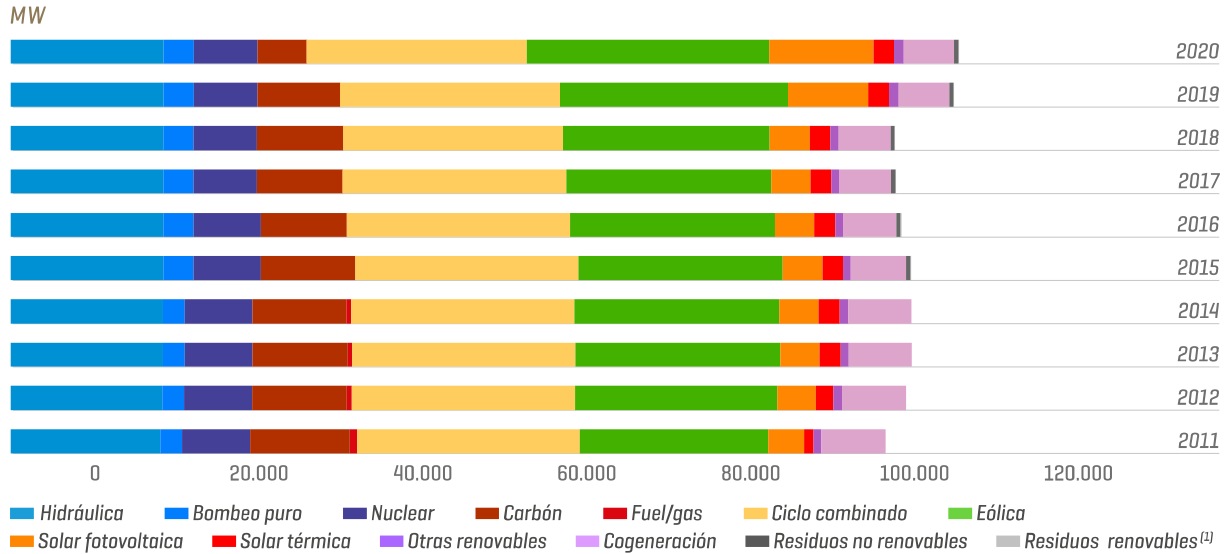
Evolución de la estructura de potencia eléctrica instalada peninsular

Figura 6. Evolución de la potencia instalada en España (2020). Fuente: “Avance del informe del sistema eléctrico español 2020” <https://bit.ly/3mMLITi>

Potencia eléctrica instalada peninsular

a 31 de diciembre de 2021

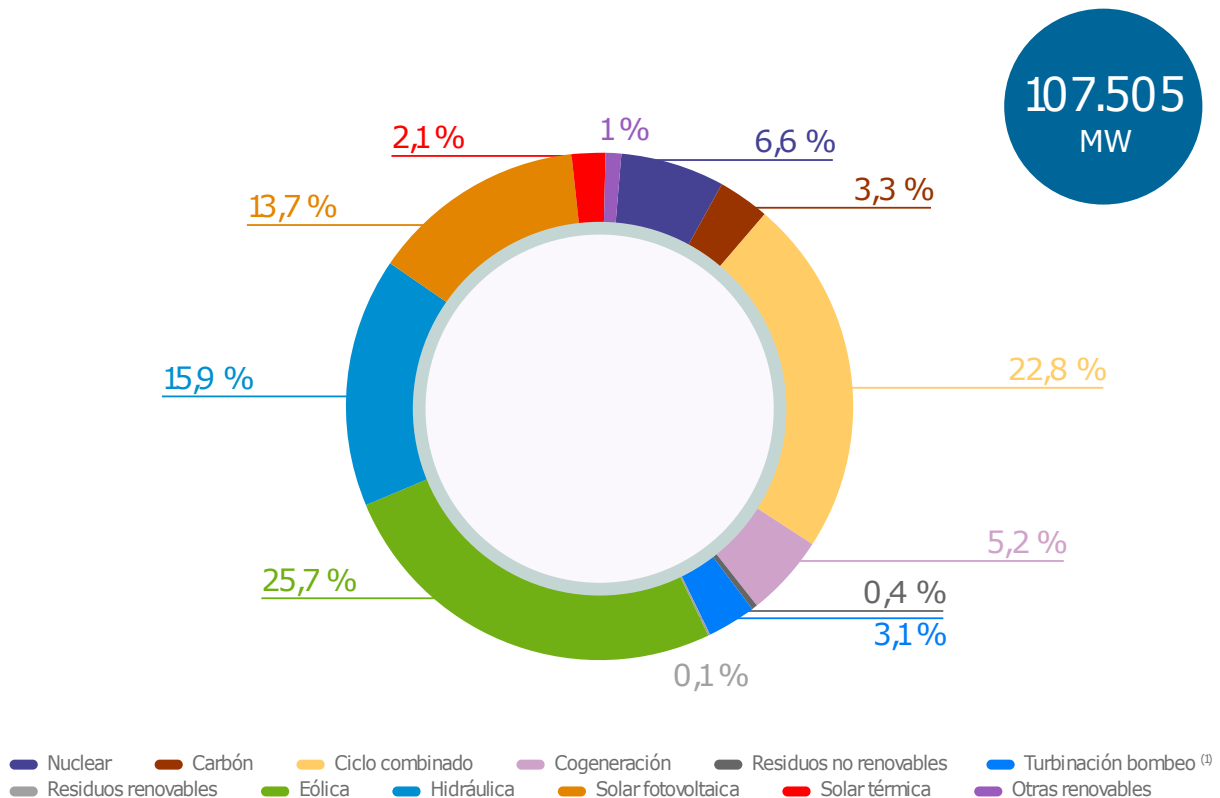


Figura 7. Potencia instalada en España a 31 de diciembre del 2021. Fuente: “Avance del informe del sistema eléctrico español 2021” <https://bit.ly/3mMLITi>

importante darse cuenta de que en este caso estamos hablando de **la contribución de cada tecnología a la generación eléctrica en España en 2021**. **¿Dónde está el error?** La respuesta es fácil: no hay error, estamos hablando cosas distintas: **potencia y energía**.

Importante 1.5: Potencia y Energía (I)

Es fundamental entender claramente la diferencia entre **potencia** (potencia instalada en este caso) y **energía** (energía generada por cada tecnología para satisfacer la demanda de energía eléctrica).

La potencia instalada (también denominada potencia nominal o *capacity* en inglés) se refiere a la capacidad total de una central determinada de generar electricidad. Sin embargo, esta “capacidad” no es usada necesariamente de manera continua. Por ejemplo, las centrales nucleares suelen operar de manera ininterrumpida, debido a los costes/dificultad asociados a sus paradas o regulación en la generación (de ahí su posición en el “mix” de generación en nuestro país). Por el contrario, otras tecnologías como la generación eléctrica basada en gas natural sí permiten una regulación de la generación^a.

^aEste aspecto es fundamental cuando hablamos de la integración de las EERR en el sistema eléctrico debido a su variabilidad en la generación: su dependencia del recurso (de que haya o no radiación solar directa o viento, por ejemplo).

Importante 1.6: Potencia

La definición de **potencia** se refiere simplemente a energía por tiempo, esto es: cuánta energía es gastada durante un tiempo determinado, siendo su unidad más común el Vatio (W).

Cuestión 1.4: Potencia [250 XP]

Tenemos una barra con pesas con un peso total de 50 kg y queremos subirla verticalmente 1 metro:

1. ¿Qué **energía** requiere dicho proceso?
2. ¿Qué **potencia** se requiere para realizar el proceso en 1 segundo? ¿Y en 4 segundos?

En relación con este tema, puede resultar interesante conocer la potencia nominal “típica” de las principales tecnologías involucradas en la generación eléctrica²:

Central Nuclear 1000 MW

Planta de Ciclo Combinado 800 MW

Central Térmica de Carbón 500 MW

Central Hidroeléctrica 100-400 MW

²En este punto se hace referencia a la potencia nominal que puede considerarse típica o media de una central de estas tecnologías.

Generación Eléctrica en España Año 2021

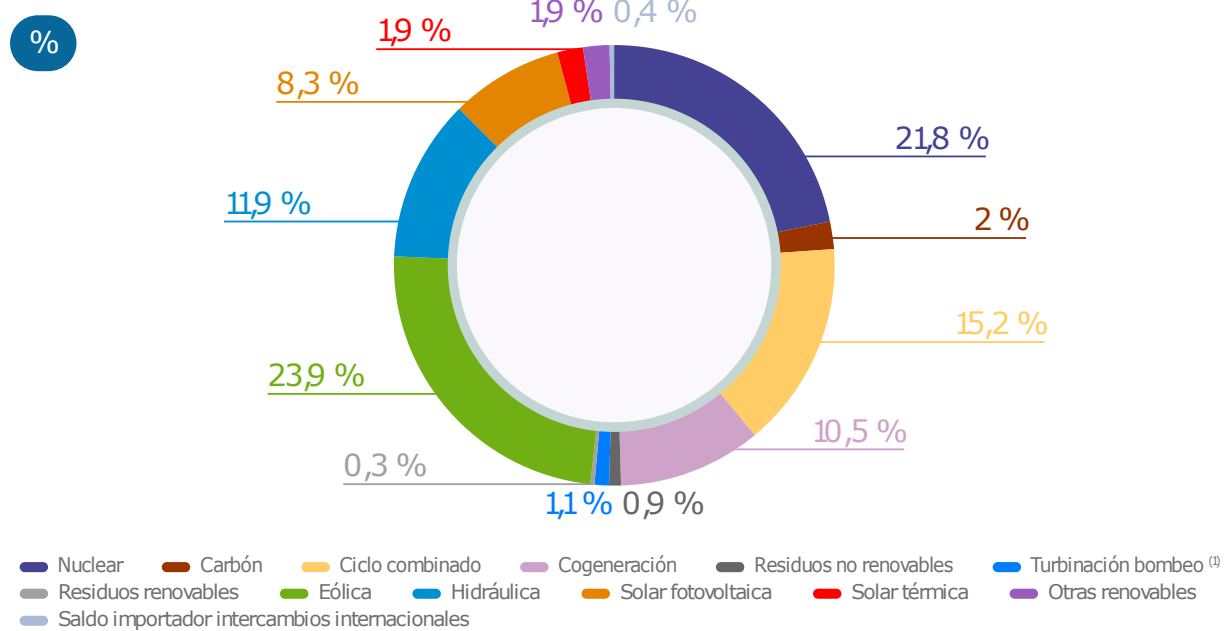


Figura 8. Generación eléctrica en España (2021). Fuente: REE: “Avance del informe del sistema eléctrico español 2021”. <http://bit.ly/2HGg7Ac>

Parque Eólico 50MW¹

Planta CSP (Concentrating Solar Power) 50 MW

Huerto Solar (Planta Fotovoltaica (FV)) 20-50 MW

Cuestión 1.5: Cuestiones sobre Energía Hidráulica [400 XP]

Contesta (y justifica) las siguientes preguntas **con tus propias palabras**:

- ¿Puede la **energía hidráulica** considerarse como una **energía renovable**?
- La producción de una central hidroeléctrica: ¿será **constante** a lo largo de varios años?
- Encuentra los datos del % de contribución de la energía hidráulica a la generación eléctrica en España en los últimos años y justifica con ellos tu respuesta a la pregunta anterior.

¹This might be the average power of a wind farm in Spain; however, there are large-scale wind farms with much higher powers.

Importante 1.7: Grandes Centrales Renovables

Las potencias nominales de ciertas tecnologías renovables, como la solar fotovoltaica o la eólica, están en continuo crecimiento. Algunos ejemplos de estas grandes centrales:

La presa de las 3 gargantas (China) que constituye la central hidroeléctrica de mayor capacidad del mundo (22.500 MW) <https://bit.ly/10Yigzt>

La central Crescent Dunes CSP con una potencia nominal de 110 MW: <http://bit.ly/1XN0Ixn>

Parque eólico offshore^a en el Reino Unido con una potencia acumulada total de 1.2 GW: <http://bit.ly/2xwXpS0>

Tengger Desert Solar Park (Planta Solar FV) en China con una potencia nominal de 1547 MWp y un área ocupada de 43 km² <http://bit.ly/2s4BRvE>

^aLos parques eólicos off-shore se construyen en el mar, normalmente sobre la plataforma continental a unos pocos kilómetros de la costa.

1.5. ¿Por qué surgen las EERR?

Una vez que hemos analizado el concepto de energía renovable, e incluso conocemos ya algunos datos sobre su contribución en España a la generación eléctrica, puede ser un buen momento para reflexionar sobre el porqué de su nacimiento y relevancia actual.

Se trata, sin lugar a dudas, de un problema complejo que no tiene una única respuesta. Algunos de los factores clave en este ámbito pueden ser los siguientes:

1. Agotamiento de las reservas de combustibles fósiles
2. Seguridad en el suministro energético
3. Cambio climático y Desarrollo sostenible
4. Aumento de la demanda energética mundial

Revisemos brevemente cada uno de estos factores.

1.5.1. Agotamiento de los Combustibles Fósiles

Para empezar con este tema veamos la gráfica de la [Figura 9](#): resulta impactante ¿verdad?

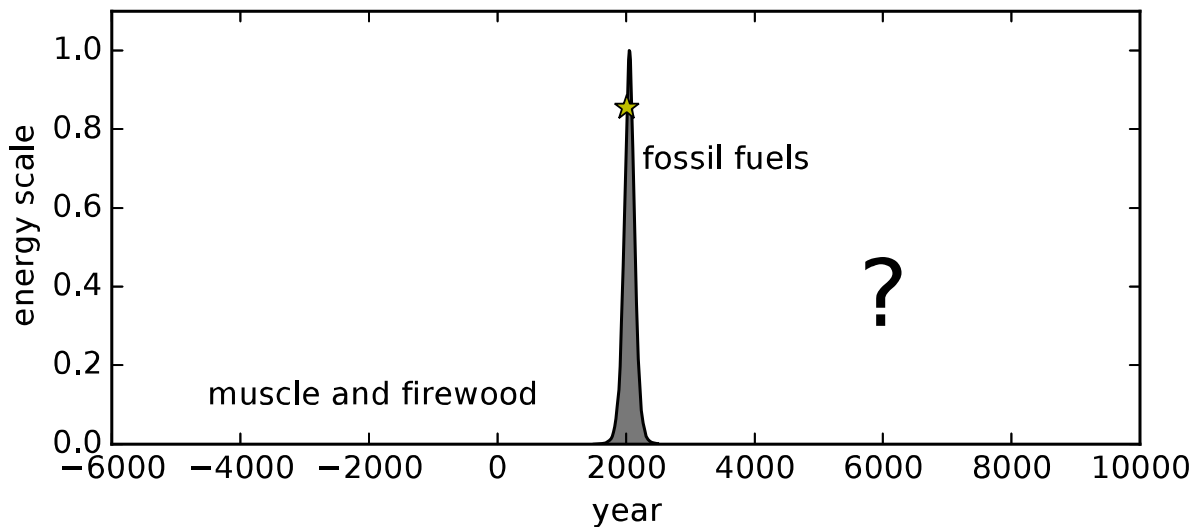


Figura 9. Uso de los combustibles fósiles a lo largo del tiempo. Fuente: “Energy and human ambitions on a finite planet” (Thomas W. Murphy). Licencia: CC-by-NC 4.0. Enlace: <https://bit.ly/3d0Rg9N>.

Cuestión 1.6: Uso de los combustibles fósiles a lo largo del tiempo [400 XP]

Observa la [Figura 9](#) y explica su sentido e implicaciones con tus propias palabras. Describe el escenario energético que, teniendo en cuenta esta gráfica y según tu criterio, vayamos a tener en el año 2200 (la curva de la gráfica ya habrá llegado de nuevo al nivel 0).

Si hiciésemos zoom sobre la figura anterior (sobre los datos reales, no los previstos de cara a futuro), veríamos como el uso de los combustibles fósiles despegó en el siglo XVIII en Inglaterra con el **carbón** con motivo de la **revolución industrial**. La [Figura 10](#) muestra la evolución en el uso de estos combustibles fósiles, empezando con un uso intensivo del **carbón**, al que posteriormente se unió el **petróleo** y, finalmente, el **gas natural**.

Cuestión 1.7: El carbón y la Revolución Industrial (250 XP)

Investiga un poco y explica, con tus propias palabras, por qué el carbón fue clave en la Revolución Industrial: ¿para qué se usó el carbón a finales de los siglos XVIII y XIX?

¿Realmente se van a agotar las reservas de combustibles fósiles? Los estudios realizados al respecto son concluyentes. Las **reservas de combustibles fósiles son finitas** y teniendo en cuenta la tasa de consumo actual las estimaciones indican que las **reservas de carbón podrían durar unos 120 años**, las de **petróleo unos 45** y las de **gas natural unos 60**. Estos datos indican un escenario en el cual es probable que veamos la desaparición de estas fuentes de energía en un futuro cercano.

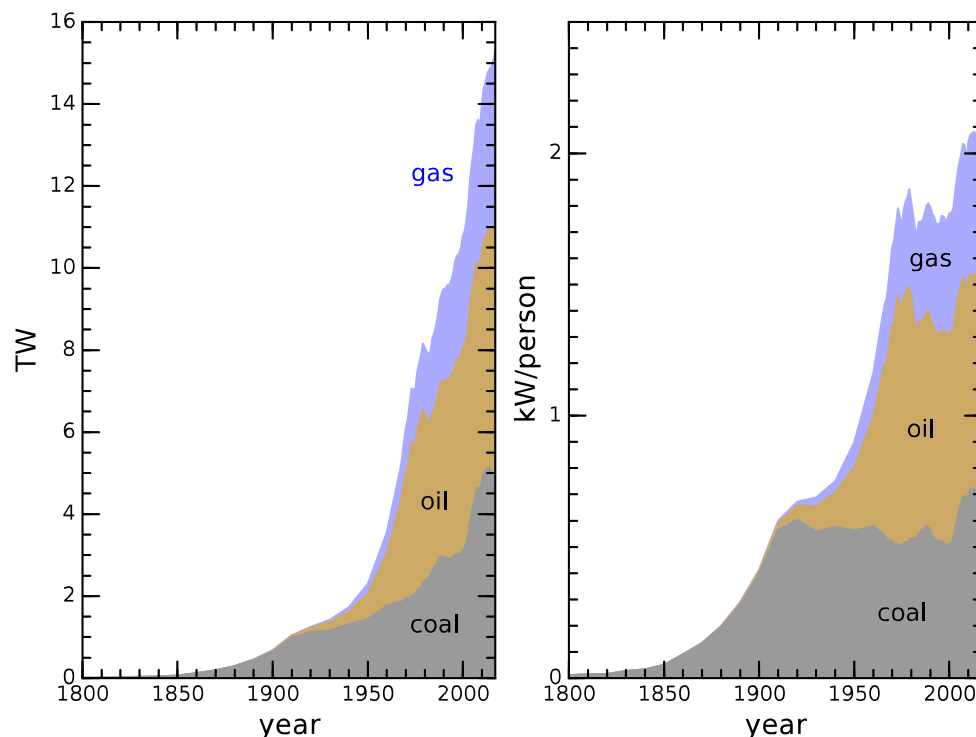


Figura 10. Uso de combustibles fósiles desde la Revolución Industrial. Fuente: “Energy and human ambitions on a finite planet” (Thomas W. Murphy). Licencia: CC-by-NC 4.0. Enlace: <https://bit.ly/3d0Rg9N>.

Cuestión 1.8: ¿Realmente se va a acabar el petróleo? (500 XP)

Se trata evidentemente de un tema controvertido con opiniones en muchos casos encontradas. En estos casos, una buena práctica para salir de dudas y alejarse de fuentes poco fiables es recurrir a estudios científicos (artículos en revistas internacionales, comúnmente conocidos como *papers*). Prueba a buscar en *Google Scholar* algún artículo sobre este tema y contrasta sus conclusiones con los datos mencionados. Resume las conclusiones principales **con tus propias palabras**. *Nota: la inmensa mayoría de la producción científica mundial se realiza en inglés.*

Importante 1.8: Combustibles fósiles ... ¿renovables?

La idea puede parecer chocante pero, ¿podrían los **combustibles fósiles** ser considerados como un recurso **renovable**? Para contestar a esta pregunta es necesario conocer cómo se generan los combustibles fósiles. Podemos considerar que estos recursos se han formado durante mucho tiempo (unos **100 millones de años**) a partir de la materia orgánica de plantas (también microorganismos, bacterias, etc.) que contenían energía química generada a partir de la energía del Sol por medio de la fotosíntesis. Por otro lado, sabemos que el Sol aporta una potencia de unos 100 TW a la fotosíntesis en la Tierra. De esos 100 TW, se estima que unos **30 MW** contribuyen a la generación de **nuevos** combustibles fósiles.

La pregunta ahora es: ¿a qué velocidad consumimos a día de hoy combustibles fósiles? La respuesta es a unos **15 TW**, lo que significa que se consumen a una velocidad 500.000 veces mayor que su tasa de reposición. Así que volviendo a la pregunta inicial: **sí, podríamos considerar los combustibles fósiles renovables si los gastásemos a una tasa igual o inferior a esos 30 MW**.

¡IMPORTANTE! El *ratio* consumo/reposición de combustibles fósiles sería equivalente a cargar un móvil en 2 horas y descargarlo completamente en 0,014 segundos^a.

^aFuente: "Energy and human ambitions on a finite planet" (Thomas W. Murphy). Licencia: CC-by-NC 4.0. Enlace: <https://bit.ly/3d0Rg9N>.

Por otro lado, el problema no reside sólo en el posible agotamiento de fuentes como el petróleo, sino también en el hecho de que la producción de los pozos actuales ("petróleo fácil") se espera que disminuya drásticamente en los próximos años. Esto implica que tendrán que explotarse y descubrirse nuevos pozos, con un esfuerzo económico muy superior al realizado en la actualidad (en muchos casos hablamos de yacimientos en el Ártico o en emplazamientos en los océanos alejados de la costa). En resumen: **será más caro extraer petróleo** y, por lo tanto, menos rentable.

Substance	kcal/g
Gasoline	11
Fat (food)	9
Carbohydrates	4
Rocket Fuel	4
TNT explosive	1
Alkaline battery	0.11
Tesla Powerwall	0.10
Lead-acid battery	0.03
Hydroelectric (50 m)	0.0001

Figura 11. Densidad de energía de diferentes elementos. Fuente: "Energy and human ambitions on a finite planet" (Thomas W. Murphy). Licencia: CC-by-NC 4.0. Enlace: <https://bit.ly/3d0Rg9N>.

En este contexto, las energías renovables surgen en parte por la necesidad de mantener (probablemente sería más correcto decir "aumentar") la producción de energía mundial para dar cobertura a una demanda en constante crecimiento, adelantando el que parece será

obligado cambio de modelo basado en los combustibles fósiles.

Antes de pasar a la siguiente sección conviene recordar que, aunque hoy en día tienen “mala prensa”, los combustibles fósiles presentan grandes ventajas (de ahí que hayan sido tan usados en estas décadas), siendo una de ellas su **densidad de energía**. En la tabla de la [Figura 11](#) se muestra una comparativa de la densidad de energía de diferentes elementos, desde un derivado de los combustibles fósiles como la **gasolina**, a una energía renovable como la **hidráulica** (*hydroelectric*), pasando por las **baterías de litio-ion** (*Tesla Powerwall*) o las **pilas alcalinas**.

1.5.2. Dependencia Energética (Seguridad en el Suministro de Energía)

Según Eurostat:

“Energy dependency shows the extent to which an economy relies upon imports in order to meet its energy needs. The indicator is calculated as net imports divided by the sum of gross inland energy consumption plus bunkers¹”

Existen muchos países, como España, que no disponen de los recursos o infraestructura necesarios para auto-abastecerse, o simplemente deciden no hacerlo por determinados intereses. Por ello, en muchos casos existe la necesidad de comprar recursos o energía a otros países. Sin embargo, esto es una situación en general a evitar, ya que diferentes condicionantes **geo-políticos** pueden afectar a la seguridad del suministro (que se cumpla con lo acordado) así como a los precios. Ejemplos de estas situaciones las tenemos hoy en día en Oriente Medio (Siria, Irak, etc.) así como en el conflicto ruso-ucraniano y el suministro de gas a buena parte del norte de Europa.

Importante 1.9: Dependencia Energética: España

La **dependencia energética de España** se cifra en el entorno del **80 %**, al no disponer de significativas reservas de combustibles fósiles. Esta situación, junto con las condiciones geográficas óptimas de nuestro país en relación a la explotación de los recursos solares, eólicos o derivados de los océanos (corrientes, olas, gradiente térmico), podría llevar a la conclusión de que una inversión en EERR sería interesante para España.

1.5.3. Desarrollo Sostenible

Al margen de la demanda energética, existe otro concepto fuertemente ligado a las energías renovables y a su relevancia en la actualidad: el *desarrollo sostenible*². Una posible definición sería la siguiente:

“Vivir, producir y consumir de modo que se satisfagan las necesidades actuales sin com-

¹El término 'bunkers' hace referencia a reservas de ciertos combustibles, por ejemplo petróleo, que los países pueden considerar oportuno almacenar.

²En la sección 1.3 ya se ha revisado el concepto de *Energía Sostenible*

prometer la posibilidad de que las generaciones futuras satisfagan las suyas” (Brundtland, 1987)

Eurostat aporta una definición similar:

‘Sustainable development is the organizing principle for meeting human development goals while at the same time sustaining the ability of natural systems to provide the natural resources and ecosystem services upon which the economy and society depend.’

El concepto de **desarrollo sostenible** está íntimamente relacionado con el de **cambio climático**, que vamos a analizar con más detalle un poco más adelante. Y a su vez, estos conceptos se relacionan con las energías renovables, ya que éstas constituyen una alternativa natural al uso de combustibles fósiles (y en cierta medida también a la energía nuclear). El uso de combustibles fósiles presenta varias consecuencias negativas, como el agotamiento de recursos naturales, la polución del aire (y los efectos medioambientales o en los seres vivos asociados) o la lluvia ácida, entre otros¹.

Cuestión 1.9: Biomasa: ¿Renovable y Sostenible? (400 XP)

El concepto de energía sostenible ya ha sido tratado al comienzo de este capítulo. En este sentido, investiga acerca de la Biomasa como fuente de energía y responde, con tus propias palabras, a las siguientes preguntas:

1. ¿Se puede considerar a la Biomasa una energía **renovable**?
2. ¿Se puede considerar a la Biomasa una energía **sostenible**?

Busca y comenta alguna noticia donde se hable sobre los posibles problemas de la biomasa como fuente de generación eléctrica.

1.5.4. Demanda Energética

¿Existe relación entre las EERR y la demanda energética? **Indudablemente SÍ**. Analicemos algunos datos para fundamentar esta respuesta.

En primer lugar, resulta obvio que la demanda de energía² ha crecido de manera significativa en las últimas décadas. Un primer análisis de la [Figura 12](#), en concreto la gráfica de la izquierda, nos muestra claramente como el consumo de energía ha experimentado un fuerte crecimiento. Es interesante ver como prácticamente todas las fuentes de energía han aumentado su contribución, destacando especialmente el crecimiento de las renovables en los últimos años. En la gráfica de la derecha se muestra la contribución relativa de cada fuente de energía, donde podemos apreciar como, por ejemplo, el petróleo ha visto disminuida su contribución en %, aunque como hemos visto aumenta su contribución total. **El impacto**

¹Es importante destacar que estos efectos adversos también son provocados por otras tecnologías, incluidas algunas renovables.

²En este caso hablamos de **consumo final de energía/energía primaria**.

de la pandemia de **COVID-19** se puede apreciar claramente en la gráfica de la izquierda, primero con un fuerte descenso del consumo global en **2020**, para mostrar posteriormente una fuerte recuperación en **2021**.

Llegados a este punto podríamos pensar que esto pudiera deberse a el fuerte crecimiento demográfico que se ha vivido en este periodo. Sin embargo, esto no justifica por sí solo este hecho, ya que si analizamos la evolución del consumo de energía per capita (por persona), veremos también ha experimentado un crecimiento significativo en las últimas décadas, tanto desde el punto de vista del consumo final total de energía como del consumo de energía eléctrica.

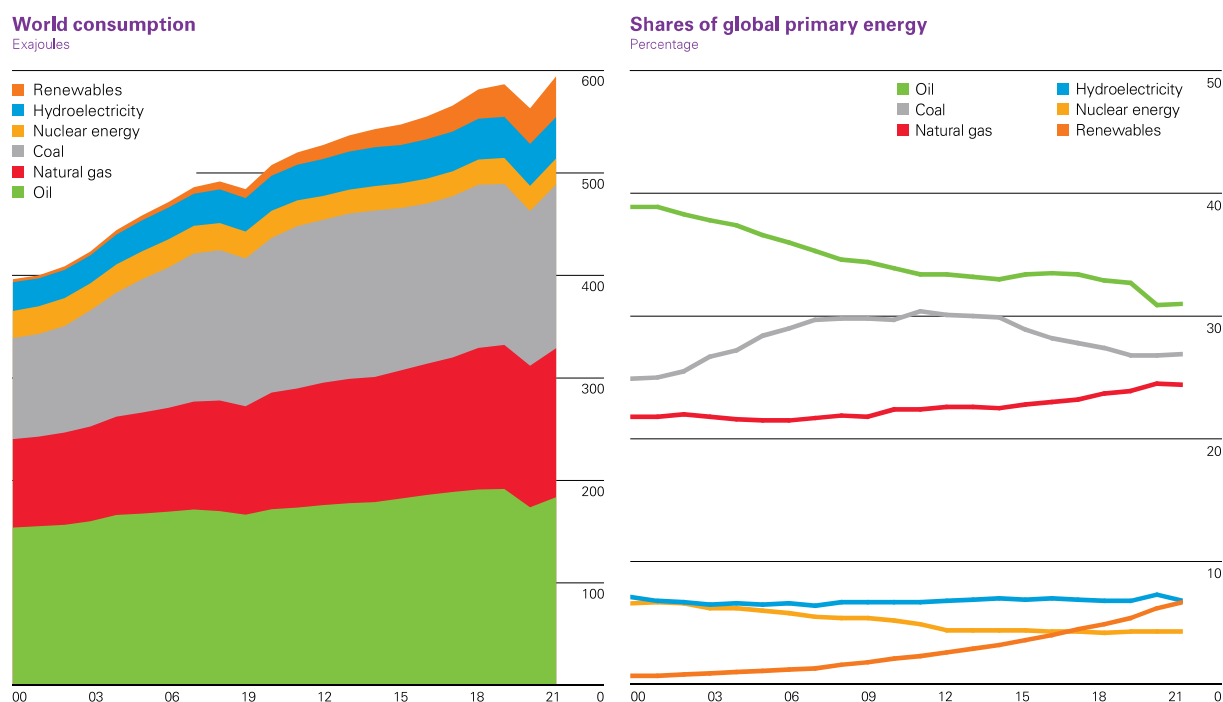


Figura 12. Evolución del consumo de energía mundial según la fuente empleada. Fuente: BP Statistical Review of World Energy 2022. Enlace: <https://on.bp.com/3MQk8q>

Importante 1.10: Energía Primaria/Consumo Final de Energía vs. Electricidad

Aunque no se ha especificado, los datos de la [Figura 12](#) se refieren a **energía primaria** o, más concretamente, al consumo final de energía (y no al consumo de energía eléctrica).

Resulta también muy interesante el análisis de la [Figura 13](#), donde se presenta una comparativa del % de cobertura de las diferentes fuentes de energía en 1973 y en 2018. Puede apreciarse como el **retroceso del petróleo**, que disminuye casi un **15 %** (del 46.2 a un 31.6 %), es cubierto tanto por el gas natural, como por el carbón y la energía nuclear. En menor medida han contribuido también las energías renovables (*Other*) (eólica, solar fotovoltaica y de concentración, etc.) que llegan al 2%.

Queda claro que las figuras anteriores están referidas a la cobertura de energía primaria pero, ¿qué ocurre si nos fijamos exclusivamente en la generación de energía eléctrica? ¿Cambiará significativamente la contribución de las diferentes fuentes de energía?

Nuevamente, el análisis de la evolución de la estructura de generación eléctrica resulta sumamente interesante (Figura 14). Por un lado resulta significativo el descenso del petróleo frente al carbón (se mantiene) y el gas natural (con un aumento del 11 %). Por otro lado, resulta evidente que la energía hidráulica, la nuclear y, en menor medida, las renovables (al margen de la hidráulica), tienen un mayor protagonismo que en el marco de la generación de energía primaria.

Importante 1.11: El coste de los combustibles fósiles

¿Qué es más caro: el petróleo, el gas natural o el carbón?

Para responder a esta pregunta no basta sólo con conocer el precio del barril de petróleo (35 \$), sino también su capacidad de generar energía (6.1 GJ/barril). El coste del **petróleo** estaría entonces en **5.7 \$/GJ**, mientras que el del **carbón** sería **1.6 \$/GJ** y el del **gas natural** **2.5**. Como referencia, si suponemos un precio medio del kWh (electricidad en los hogares) de 0.13 \$/kWh, esto nos lleva a una cifra de **36 \$/GJ**.

Importante 1.12: Demanda Energética Global

Si bien la demanda energética global se encuentra en constante crecimiento, la demanda de los **países desarrollados** (USA, Unión Europea) se ha mantenido constante en los últimos años. Son países en proceso de desarrollo como China o India los que lideran el aumento en el consumo energético.

La máxima **demanda eléctrica** en España en el 2018^a, por ejemplo, fue aproximadamente un 10 % inferior a la demanda récord de 2007.

^aLa demanda máxima de energía eléctrica en España tuvo lugar el 8 de febrero a las 20.24 horas, con un total de 40947 MW.

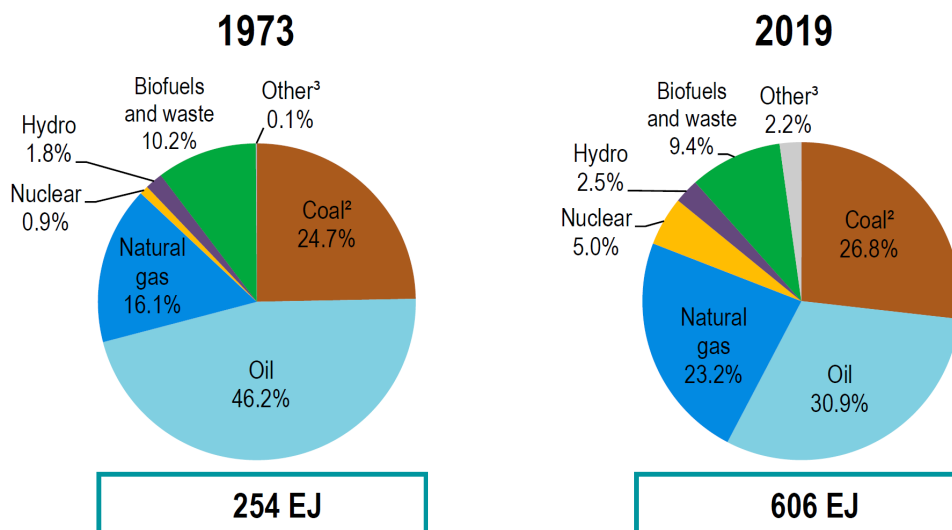
Cuestión 1.10: Demanda de Energía Primaria por Regiones (500 XP)

Cuando buscamos información de cualquier tipo, es fundamental encontrar las fuentes adecuadas. En lo referente al sector energético, el informe **Key World Energy Statistics** (publicado por la IEA: International Energy Agency) es una fuente muy fiable. Antes de consultar este informe, trata de hacer una lista ordenada según el consumo de energía primaria de las diferentes regiones (Africa, America, Asia, Europa y Oceanía). Ahora busca esta información en el informe de 2021 de la IEA y escribe un breve comentario al respecto. ¿Te sorprende la región que aparece en 1ª posición?

1.6. Cambio Climático

Indudablemente, el cambio climático (*climate change*, también conocido como calentamiento global (*global warming*)), es a día de hoy uno de los principales impulsores del desarrollo e implantación de las energías renovables. Resulta complicado resumir brevemente los conceptos fundamentales sobre este tema tan controvertido, ya que existen libros, películas (como la famosa *An Inconvenient Truth* de Al Gore, o el reciente documental abanderado

Share of world total energy supply by source, 1973 and 2019



1. World includes international aviation and international marine bunkers.
2. In these graphs, peat and oil shale are aggregated with coal.
3. Includes geothermal, solar, wind, tide/wave/ocean, heat and other sources.

Figura 13. Evolución de la contribución a la cobertura de energía primaria mundial. Fuente: Key world energy statistics 2021. Enlace: <https://bit.ly/3IU3nTQ>.

por Leonardo di Caprio *Before the Flood*) y cursos enteros dedicados a ello (por ejemplo *Climate Change: The Science*, ofrecido en la plataforma edX: <https://bit.ly/2IWJqN7>).

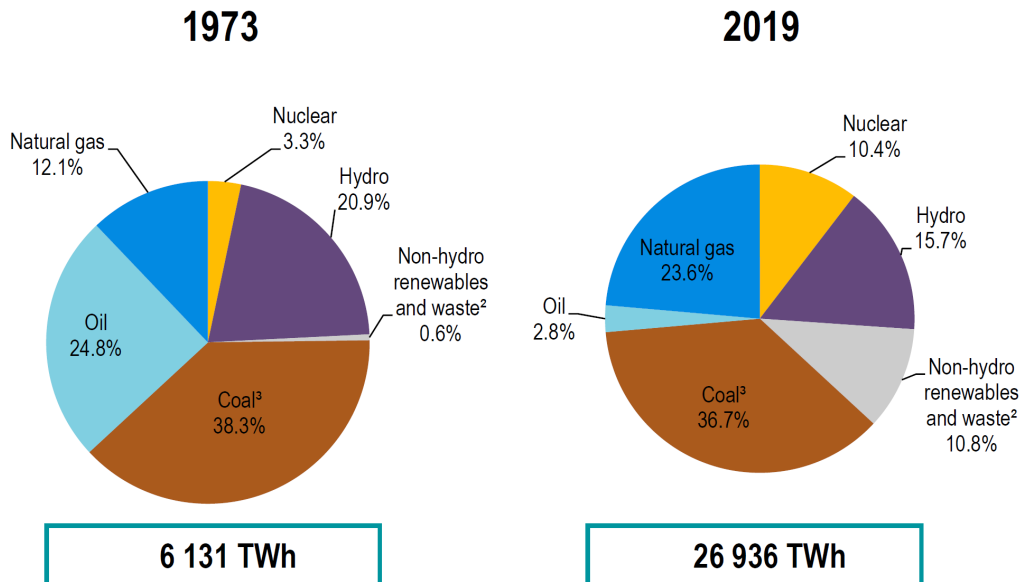
Pese a todo, en el limitado contexto de esta asignatura, en las siguientes páginas se abordarán algunos de los aspectos clave para ofrecer una panorámica lo más clarificadora posible.

1.6.1. Cambio Climático: El Efecto Invernadero

El **efecto invernadero** (*greenhouse effect*) está relacionado con la radiación que entra y sale de nuestra atmósfera, así como con la capacidad de ciertos gases (CO₂, vapor de agua, metano, etc.) de influir notablemente en estos procesos.

La **Figura 15** muestra en la parte superior tanto la radiación entrante como saliente. Puede observarse como el rango de longitudes de onda asociado a la radiación entrante (proveniente del Sol) es claramente inferior a la saliente. Estamos hablando de un rango que comprende el ultravioleta (UV), visible e infrarrojo cercano. El 70-75 % de la radiación que proviene del Sol atraviesa la atmósfera, siendo filtradas fundamentalmente componentes asociadas al UV. Por el contrario, la radiación que “escapa” de la Tierra a través de la atmósfera se genera por que nuestro planeta está «caliente», lo que hace que emita radiación a longitudes de onda mucho mayores.

En la parte central de la figura se ha representado el espectro total de absorción y *scatte*-

Share of world electricity generation¹ by source, 1973 and 2019

1. Excludes electricity generation from pumped storage.
 2. Includes geothermal, solar, wind, tide/wave/ocean, biofuels, waste, heat and other.
 3. In these graphs, peat and oil shale are aggregated with coal.

Figura 14. Evolución de la contribución a la generación eléctrica mundial. Fuente: Key world energy statistics 2021. Enlace: <https://bit.ly/3IU3nTQ>.

ring (dispersión) generado por la contribución de los diferentes gases de efecto invernadero (GHGs: *Green-House Gases*). El espectro individual de cada uno de ellos (Vapor de agua, CO₂, oxígeno y ozono, metano, NO_x (óxidos de nitrógeno)) aparece en la parte inferior. Puede apreciarse como el principal GHG es el vapor de agua. Lógicamente, cuanto mayor sea la concentración de cada gas, mayor será su efecto de bloquear la radiación saliente (a mayor concentración de GHGs, mayor temperatura de la Tierra).

Importante 1.13: Efecto Invernadero: ¿el bueno, el feo o el malo?

En ocasiones el efecto invernadero tiene una connotación negativa debido al cambio climático asociado a la acción del hombre (aumento de la emisión de gases de efecto invernadero desde la revolución industrial); sin embargo, sin el efecto que ejerce la atmósfera sobre parte de la radiación saliente, nuestro planeta no sería el mismo, ya que las temperaturas serían muy inferiores. Esto es, ha de existir una cierta concentración de gases en la atmósfera para hacer la temperatura en nuestro planeta "agradable" ... el problema es el "exceso" de estos gases.

Algunos científicos han estimado el efecto invernadero en unos 33K. Sin embargo, se trata de una aproximación básica y de un tema controvertido en sí mismo, como se puede apreciar en el artículo del profesor Robert G. Brown de la Duke University: Earth's baseline black-body model - "a damn hard problem" <https://bit.ly/2GZs84z>

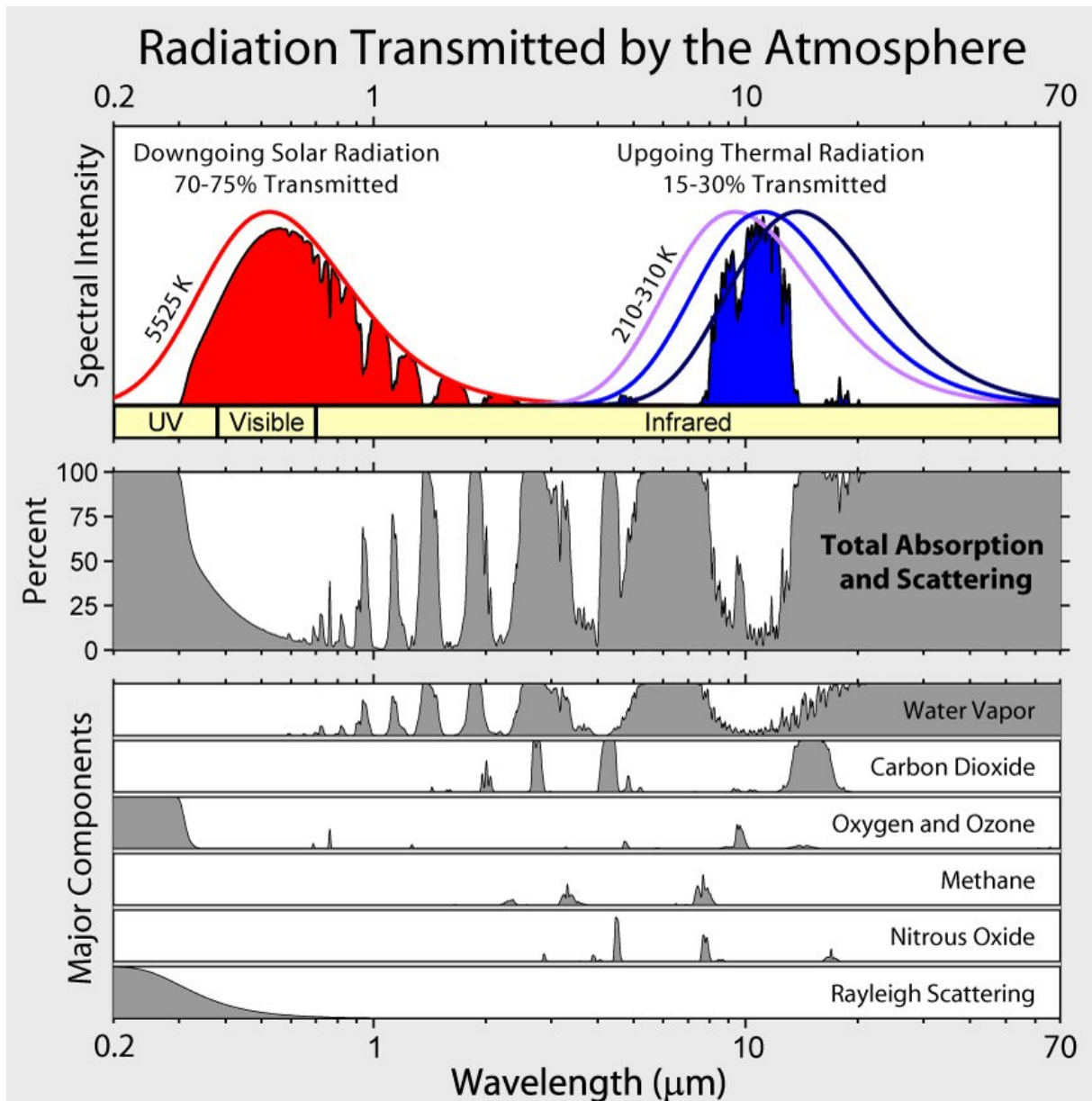


Figura 15. Radiación transmitida por la atmósfera terrestre (radiación entrante (rojo) y saliente (azul)). Fuente: <https://bit.ly/2JNVJfe>

Importante 1.14: Ley de Wiem

Todo cuerpo caliente emite radiación: la ley de Wiem establece una relación entre la temperatura de dicho cuerpo y la longitud de onda asociada.

La relación entre temperatura y λ es inversa. Observando la figura [Figura 15](#) puede observarse como la radiación del Sol está asociada a una temperatura de aproximadamente 5500 K, mientras que la de la Tierra se estima en 258 K.

1.6.2. Cambio Climático: *Feedbacks* Positivos y Negativos

El estudio del cambio climático es tremendamente complejo, ya que, entre otras factores, involucra a multitud de disciplinas científicas. Un ejemplo ilustrativo de esta complejidad es un análisis de los *feedbacks* o retroalimentaciones que se derivan de diversos factores y que pueden tener un efecto positivo o negativo sobre el cambio climático. En este contexto, cuando hablamos de *feedback* positivo querrá decir que se tratará de un efecto que “refuerza” el cambio climático, mientras que uno negativo lo contrarrestará (será positivo para evitar el calentamiento global).

Importante 1.15: Para aprender más

The National Academies Press ha publicado un libro que se puede descargar gratuitamente titulado «Understanding Climate Change Feedbacks».

Enlace de descarga: <https://bit.ly/2GY8ru9>

1.6.3. *Feedbacks* Positivos

- **Vapor de agua:** El vapor de agua es un buen ejemplo de lo anteriormente comentado. Por un lado, el vapor de agua se puede considerar como *feedback* positivo, ya que si la concentración de GHGs aumenta en la atmósfera, esto implicará un aumento en la temperatura del planeta que, a su vez, provocará una mayor evaporación del agua en los océanos lo que aumentará aún más la temperatura. Por otro lado, el vapor de agua también contribuye a la formación de nubes bajas, las cuales reflejan parte de la radiación solar incidente, tratándose por lo tanto de un *feedback* negativo. Aunque el primer efecto se suele considerar más importante, el segundo añade incertidumbre y complica el desarrollo de modelos fiables.
- **Nubes altas:** Si el vapor de agua resulta en la formación de nubes altas, éstas tienen el efecto de bloquear más la radiación infrarroja (IR) saliente que la luz visible entrante, por lo que implican un aumento de temperatura.
- **Liberación de GHGs:** Varios gases de efecto invernadero están atrapados en diferentes reservas, como por ejemplo en los océanos o en la tundra o *permafrost* siberiano. Un aumento en las temperaturas implicaría un deshielo acelerado de este *permafrost* (un millón de kilómetros cuadrados en el oeste de Siberia) y una mayor liberación de metano o una mayor liberación del CO₂ contenido en los océanos, contribuyendo ambos efectos al calentamiento global.
- **Efecto albedo:** El albedo (del latín *albus* (luz blanca)) puede definirse como la radiación reflejada por una superficie. En este contexto, el albedo de la Tierra se definirá como la cantidad de energía reflejada en relación con la radiación total incidente, por lo que este parámetro variará entre 0 y 1. El valor medio del albedo para la Tierra es de 0.367. Tal y como se puede apreciar en la siguiente figura, el hielo tiene una mayor reflectividad que otro tipo de superficies, por lo que su contribución total será mayor. De esta manera, si un aumento de temperaturas disminuye la superficie de hielo en el

planeta, esto incrementará la absorción de la radiación incidente, propiciando así un mayor aumento de las temperaturas.

- **Deforestación:** Sequías, fuegos y desertización son fenómenos que afectan a las masas forestales del planeta. Todos ellos implican la liberación de grandes reservas de CO₂ fijadas en la vegetación a la atmósfera, lo que lógicamente favorece el calentamiento global.

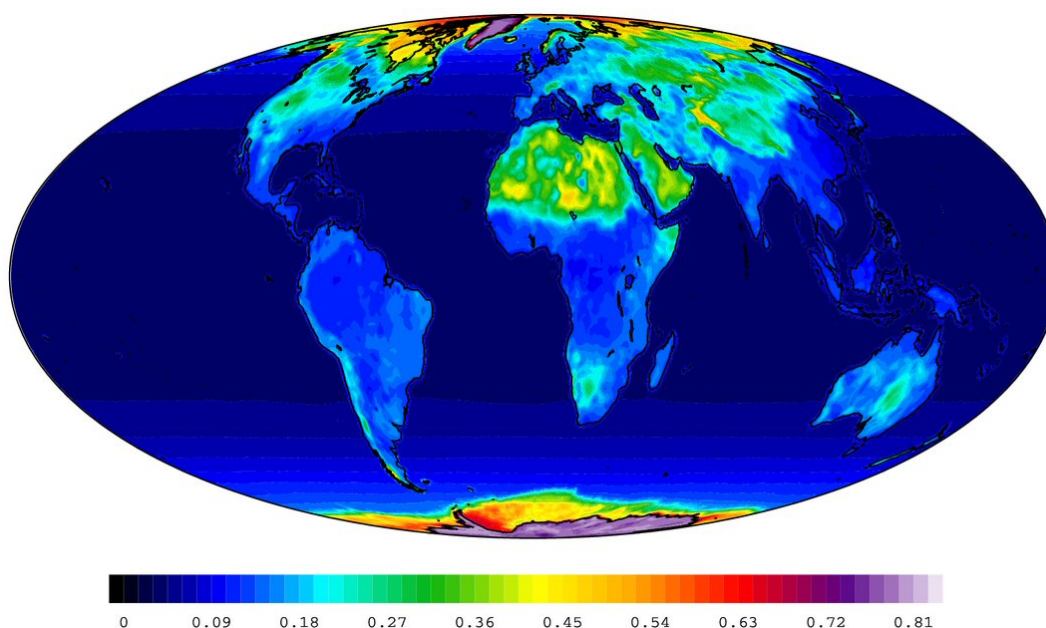


Figura 16. Albedo (promedio) en condiciones de cielo despejado. Fuente: <https://go.nasa.gov/2H0Yzj1>.

1.6.4. *Feedbacks* Negativos

- **Radiación de cuerpo negro:** La radiación emitida por la Tierra se puede modelar como si ésta fuera un cuerpo negro (un material ideal que absorbe toda la radiación incidente y emite también radiación electromagnética dependiendo de su temperatura). La cantidad total de energía es directamente dependiente de la temperatura según la siguiente expresión: $F = gT^4$. Esto implica que si aumentase la temperatura de la Tierra, ésta emitiría una mayor cantidad de energía EM (en la zona del IR), favoreciendo una reducción de la temperatura.
- **Nubes bajas:** Si un mayor nivel de vapor de agua derivado de mayores temperaturas deriva en la formación de más nubes bajas, estaríamos hablando de un feedback negativo, ya que estas nubes reflejan y absorben parte de radiación incidente en el rango visible (entre aproximadamente 400 y 700nm).
- **Efecto “fertilizador” del CO₂:** mayores niveles de CO₂ en la atmósfera estimularían un mayor crecimiento de plantas, que a su vez absorberían más CO₂ y limitarían el efecto del calentamiento global. Evidentemente este efecto tiene que ser considerado

junto con los otros derivados de mayores niveles de CO₂ para obtener una evaluación global.

- **Eliminación espontánea del CO₂ en la atmósfera:** Existen varios fenómenos naturales que deberían llevar a una mayor absorción de CO₂ por parte de los océanos si aumentase el nivel de CO₂ en la atmósfera. Ejemplos de estos procesos son el desgaste químico de rocas y la formación de conchas. Sin embargo, estamos hablando de procesos que operan en escalas temporales muy grandes, por lo que su influencia en el cambio climático no está clara.

1.6.5. Cambio Climático: Gases de Efecto Invernadero

El efecto de las GHGs o gases de efecto invernadero ya ha sido comentado con anterioridad. En la siguiente tabla puede observarse la evolución que han seguido los 4 principales gases de efecto invernadero desde la época pre-industrial hasta la actualidad. Como puede apreciarse, tres de estos cuatro gases estaban ya presentes en la atmósfera, pero su nivel ha aumentado significativamente, no sólo debido a la combustión de combustibles fósiles, sino también a causa de los efectos derivados de la ganadería, la agricultura y la deforestación.

El parámetro “**fuerza radiativa**” indica que el nivel de CO₂ contribuye con $1.46W/m^2$ adicionales a la irradiancia aportada por el Sol (aproximadamente $1000W/m^2$). El CO₂ constituye por tanto aproximadamente el 75 % del potencial de calentamiento global asociado a los GHGs.

GHG	Pre-industrial	Actualidad	Fuerza radiativa (W/m^2)
CO ₂	280 ppm ¹	387 ppm	1.46
Metano	700 ppb	1745 ppb	0.48
NO ₂	270 ppb	314ppm	0.15
CFC-12	0	533ppt	0.17

Tabla 1.2. Gases de efecto invernadero.

La [Figura 17](#) es muy interesante, no sólo por su valor científico, sino también por su **relevancia histórica**. Se trata de las primeras medidas que revelaron el problema del aumento en los niveles de CO₂ y su relación con el cambio climático. Las medidas las comenzó en 1960 Charles David Keeling, de ahí que la gráfica se denomine *Keeling Curve*. Puede apreciarse que, al margen de la tendencia anual (en azul), se ha prepresentado también la tendencia estacional (en rojo y en el detalle en la parte superior izquierda). Las variaciones estacionales se deben al efecto de la fotosíntesis (disminución en el nivel de CO₂) y la caída y descomposición de hojas y restos similares.

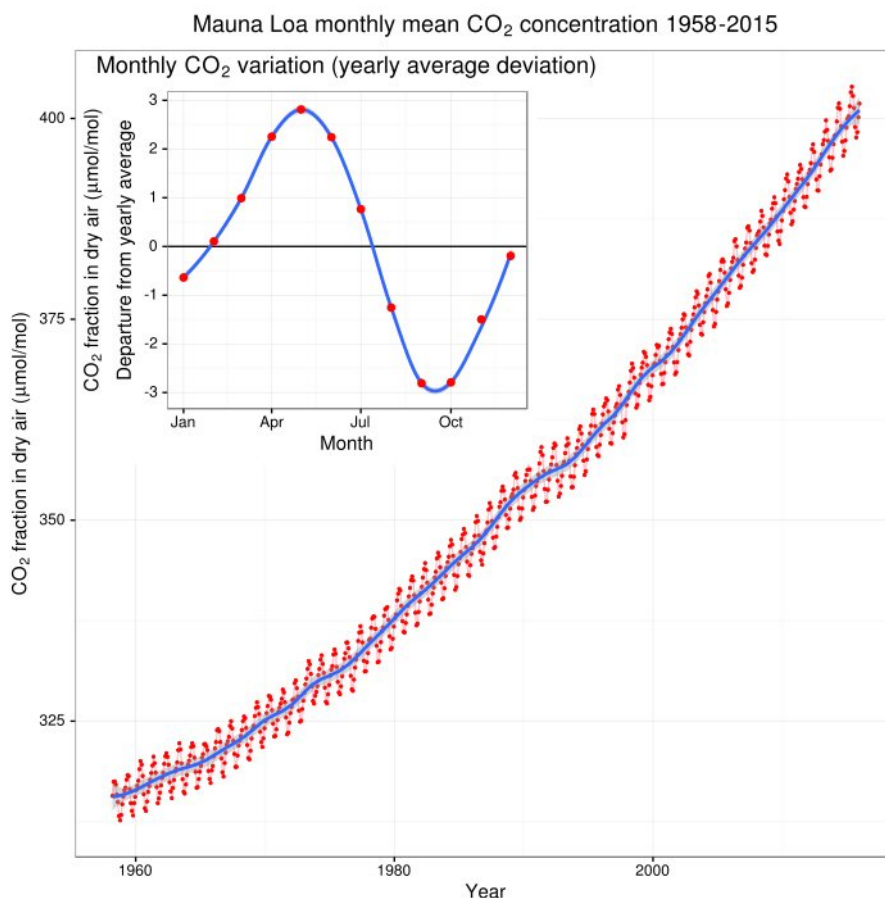


Figura 17. Evolución de los niveles de CO₂ medidos en la isla de Mauna Loa (Hawái) (*Keeling Curve*). Fuente: Delorme - Own work. Data from Dr. Pieter Tans, NOAA/ESRL and Dr. Ralph Keeling, Scripps Institution of Oceanography. Licencia CC BY-SA 4.0. <https://bit.ly/2yZvyyM>

1.6.6. Cambio Climático: Variación de la Temperatura Global y sus Causas

Existe un **amplio consenso en la comunidad científica internacional** en que el calentamiento de la superficie de la Tierra experimentado en las últimas décadas, en particular desde 1960, es debido fundamentalmente al aumento en los niveles de los gases de efecto invernadero en la atmósfera. El aumento de unos 0.6°C en la temperatura en los últimos 30 años (ver [Figura 18](#)) implicaría que, de continuar esta tendencia, la temperatura media del planeta aumentaría unos 2°C a lo largo del siglo XXI.

¿Por qué los científicos afirman conocer las causas del calentamiento global?

Por un lado se han desarrollado diferentes modelos que permiten evaluar los cambios de temperatura en función de múltiples causas, tanto “naturales” como provocadas por el ser humano. Como se puede apreciar en la [Figura 18](#), el modelo analizado representa de manera fiable los cambios medidos en la temperatura media del planeta en las últimas décadas, siendo los GHGs el factor más relevante a partir de 1960. Aunque el tema es sin lugar a dudas complicado y controvertido, existen otras evidencias que apoyan esta tesis, como el hecho de que un calentamiento global motivado fundamentalmente por el efecto invernadero implica

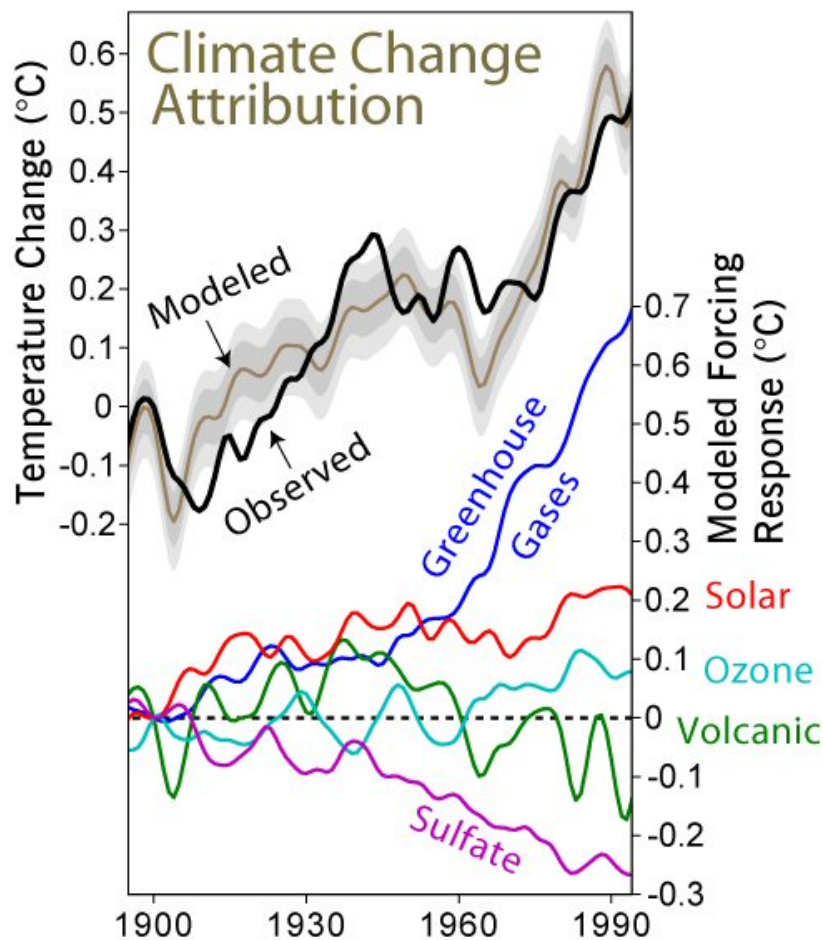


Figura 18. Modelos de la evolución de la temperatura media de la superficie de la Tierra. Fuente: NASA. Licencia CC BY-SA 3.0 <https://bit.ly/2BWnopk>

un mayor calentamiento por la noche que por el día, o en invierno que en verano o que la estratosfera se enfríe en contraste con las capas bajas de la atmósfera.

1.6.7. Cambio Climático: Predicciones para el Siglo XXI

Si bien está claro que los peligros asociados al cambio climático han conseguido movilizar tanto a gran parte de la opinión pública como a muchos gobiernos, no está claro aún el efecto que acuerdos como el **Acuerdo de París**¹ tendrá en el nivel de emisiones de CO₂ en los próximos años. Lo que sí está claro es que, si no se reducen dichas emisiones, las consecuencias pueden ir más allá de lo esperado. Diferentes equipos investigadores de todo el mundo han desarrollado modelos para estimar el aumento de temperatura que sufriría la Tierra si las emisiones continúan como hasta ahora. Los resultados de la [Figura 19](#) muestran como las predicciones oscilan entre 1.8 y 6°C².

¹https://en.wikipedia.org/wiki/Paris_Agreement

²Puede apreciarse como la discrepancia entre las estimaciones es significativa, lo que da una idea de la complejidad de tratar de modelar este problema.

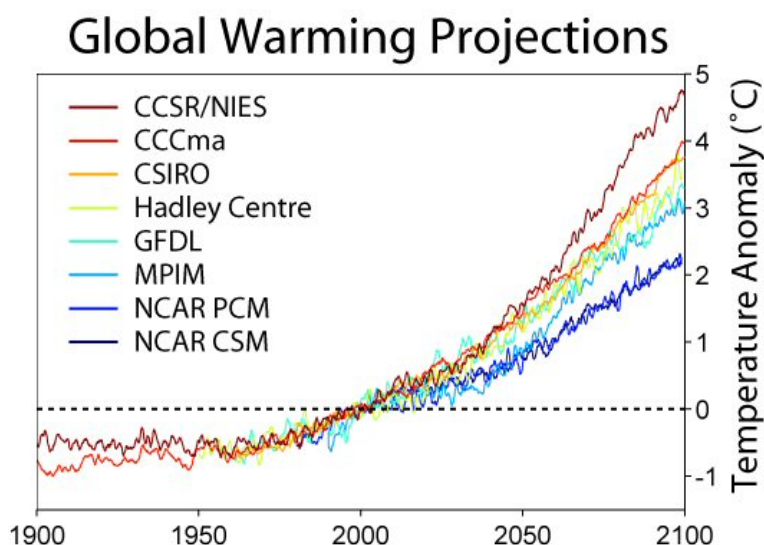


Figura 19. Predicciones sobre la evolución del cambio climático suponiendo un escenario sin reducción de emisiones. Fuente: Global Warming Art. Licencia CC BY-SA 3.0 <https://bit.ly/2JI5j3j>

1.6.8. Cambio Climático: Argumentos de los Escépticos

Como ocurre con muchos otros temas de alcance para la opinión pública, las causas esgrimidas por los científicos con respecto al cambio climático no han convencido a todo el mundo. Existen aún “escépticos” que aluden a los siguientes argumentos para proponer explicaciones alternativas:

- **Efecto “isla” en las ciudades:** este efecto se refiere al hecho de que un buen número de las medidas de temperatura se realizan mediante estaciones localizadas en entornos urbanos, donde se supone que las temperaturas aumentan de manera proporcional al tamaño del núcleo urbano. Sin embargo, los estudios realizados en papers científicos tratan de corregir este efecto, cuyo impacto en cualquier caso se considera reducido¹.
- **Las medidas de los satélites muestran un enfriamiento:** en un primer momento si existieron discrepancias en este sentido, pero esta aparente contradicción fue debida a la no consideración de una serie de correcciones necesarias en la instrumentación empleada.
- **Las temperaturas disminuyeron a mediados del siglo XX, a pesar de que los niveles de CO2 aumentaron:** efectivamente, hacia 1940 las temperaturas disminuyeron durante varios años mientras los niveles de CO2 aumentaban. La explicación que los científicos han dado a este fenómeno se basa en la contribución de los aerosoles a la atmósfera (derivados de la combustión de combustibles fósiles). El efecto de estas partículas (por ejemplo los aerosoles de sulfatos) es el de favorecer la formación de nubes y contribuir a un “oscurecimiento” global, esto es, impedir la llegada de radiación desde el Sol a la Tierra, favoreciendo una disminución de las temperaturas. Parece ser que el efecto de los aerosoles fue superior al de los GHGs durante estos años.

¹Consultar artículo de Peterson et al.: <https://bit.ly/2GY91H3>

- **Los modelos empleados no son fiables:** evidentemente existen discrepancias entre diferentes modelos (como ocurre con la predicción meteorológica), pero todos ellos se basan en leyes de la física conocidas, se han validado frente a observaciones realizadas y han realizado predicciones acertadas, como el enfriamiento estratosférico o un mayor calentamiento en el Ártico.
- **¡Ni tan siquiera podemos predecir el tiempo que hará la semana que viene!:** en realidad el pronóstico meteorológico tiene poco que ver con el pronóstico del clima a largo plazo, donde la influencia de las variaciones «aleatorias» a corto plazo desaparece. Un buen ejemplo es comparar la predicción de evolución demográfica en un país a largo plazo frente al número de nacimientos en un hospital determinado durante una semana (donde acertar con una cifra aproximada será más complicado).
- **El calentamiento global es parte de un proceso natural cíclico:** si bien se sabe que causas naturales como las variaciones en el comportamiento del Sol pueden ser impulsores de cambios climáticos, como ha ocurrido en el pasado en nuestro planeta, resultaría difícil tratar de justificar por qué el aumento de la concentración de GHGs en la atmósfera no debería causar un mayor calentamiento. Los estudios del **IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)**¹ incluyen rangos de incertidumbre para sus predicciones, indicando que cualquier predicción exacta puede ser discutida; pero las predicciones de ausencia de calentamiento no suelen ir acompañadas de dichas consideraciones.
- **Los niveles de CO2 en la atmósfera son la consecuencia y no la causa del calentamiento global:** un aumento de las temperaturas implica un aumento de los niveles de CO2 como consecuencia de las aportaciones de los océanos y el permafrost, por ejemplo. Esto ha ocurrido en el pasado en nuestro planeta. Sin embargo, existen multitud de evidencias que indican que el ser humano ha contribuido de manera significativa al aumento de la concentración de este gas en la atmósfera.
- **Un clima más cálido y mayores niveles de CO2 serían beneficiosos:** si bien esto podría ser cierto para algunas regiones específicas, en términos generales, y teniendo en cuenta consideraciones adicionales como el aumento del nivel del mar, de la acidez de los océanos o de eventos meteorológicos extremos, no parece que el calentamiento global vaya a ser beneficioso ni para el ser humano ni para los ecosistemas que nos rodean.
- **No existe consenso científico sobre el cambio climático:** esta afirmación es una de las más socorridas a la hora de cuestionar el papel del hombre en el calentamiento global. Sin embargo, existe un consenso casi unánime en la comunidad científica internacional, lo que es de destacar teniendo en cuenta la cantidad de instituciones y lo heterogéneo de los campos de investigación involucrados. Una buena referencia en este sentido es el artículo publicado por Cook et al. en 2013², donde, habiendo analizado 11944 publicaciones científicas, se concluye que el consenso sobre el origen antropocéntrico del cambio climático se puede estimar en un 97.2%.

¹<https://www.ipcc.ch/>

²<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/8/2/024024>

Importante 1.16: Donald Trump y el Cambio Climático

Un buen ejemplo de escepticismo sobre el cambio climático lo representa Donald Trump, elegido presidente de los EEUU el 9 de noviembre del 2016. Durante su campaña electoral ha indicado en numerosas ocasiones que eliminará todos los fondos que su país dedica a la lucha contra el cambio climático. En el año 2012 publicó un tweet indicando que el concepto del calentamiento global es un *complot* elaborado por China: *“The concept of global warming was created by and for the Chinese in order to make U.S. manufacturing non-competitive”*

1.6.9. Cambio Climático: Conclusiones

El objetivo de las páginas anteriores es el de tratar de aportar un poco de luz sobre un tema tremendamente complejo y controvertido.

Que el cambio climático existe y que ha sido fundamentalmente provocado por el hombre son hechos asumidos por una muy amplia mayoría de la comunidad científica internacional.

Que el cambio climático implica serios riesgos para el ser humano y los ecosistemas que nos rodean parece obvio. Por ello, desde hace años diversos organismos y gobiernos han desarrollado iniciativas plasmadas en diferentes acuerdos, como el **Protocolo de Kyoto o el Acuerdo de París**, para tratar de luchar contra este fenómeno. Las energías renovables son un factor clave en la transformación que debe sufrir (y que de hecho ya está experimentando) el sector energético y la sociedad en general en la lucha contra el cambio climático. Las emisiones directamente relacionadas con la generación de energía eléctrica y calor se pueden estimar en el 25 % del total.

El diagrama de la [Figura 20](#) muestra un análisis de las emisiones globales de GHGs por fuente y sector. Se observa claramente como los combustibles fósiles contribuyen con un 65 % al total de emisiones, mientras que el 35 % restante se cataloga como “emisiones directas”. En esta categoría se pueden englobar las emisiones asociadas a los sectores agrícolas y ganaderos (por ejemplo emisiones de metano por parte del ganado (varias toneladas cada día), a las transformaciones de uso del campo (árboles talados) o a las emisiones asociadas a los residuos (para estudiar con más detalle el diagrama se ha incluido el *link* en el pie de la figura).

Las energías renovables parecen, por tanto, predestinadas a tener un protagonismo significativo en el cambio energético que se vivirá en las próximas décadas con el probable abandono de los combustibles fósiles.

Por último, en los últimos años se está realizando un gran esfuerzo en tecnologías que permitan, no ya reducir las emisiones de GHGs a la atmósfera, sino la **captura de dichos gases, en particular del CO₂ de la atmósfera**. Estamos hablando de estrategias activas para la reducción de los niveles de estos gases, donde no sólo hay que considerar su captura sino también su almacenamiento (en yacimientos geológicos, en los océanos, etc.). El éxito de este enfoque dependerá de diversos factores, desde el apoyo económico que reciban estas iniciativas a la solución de problemas tecnológicos como la potencial peligrosidad de las reservas de CO₂.

El **IPCC** ha elaborado un documento sobre este tema titulado *“Carbon dioxide capture*

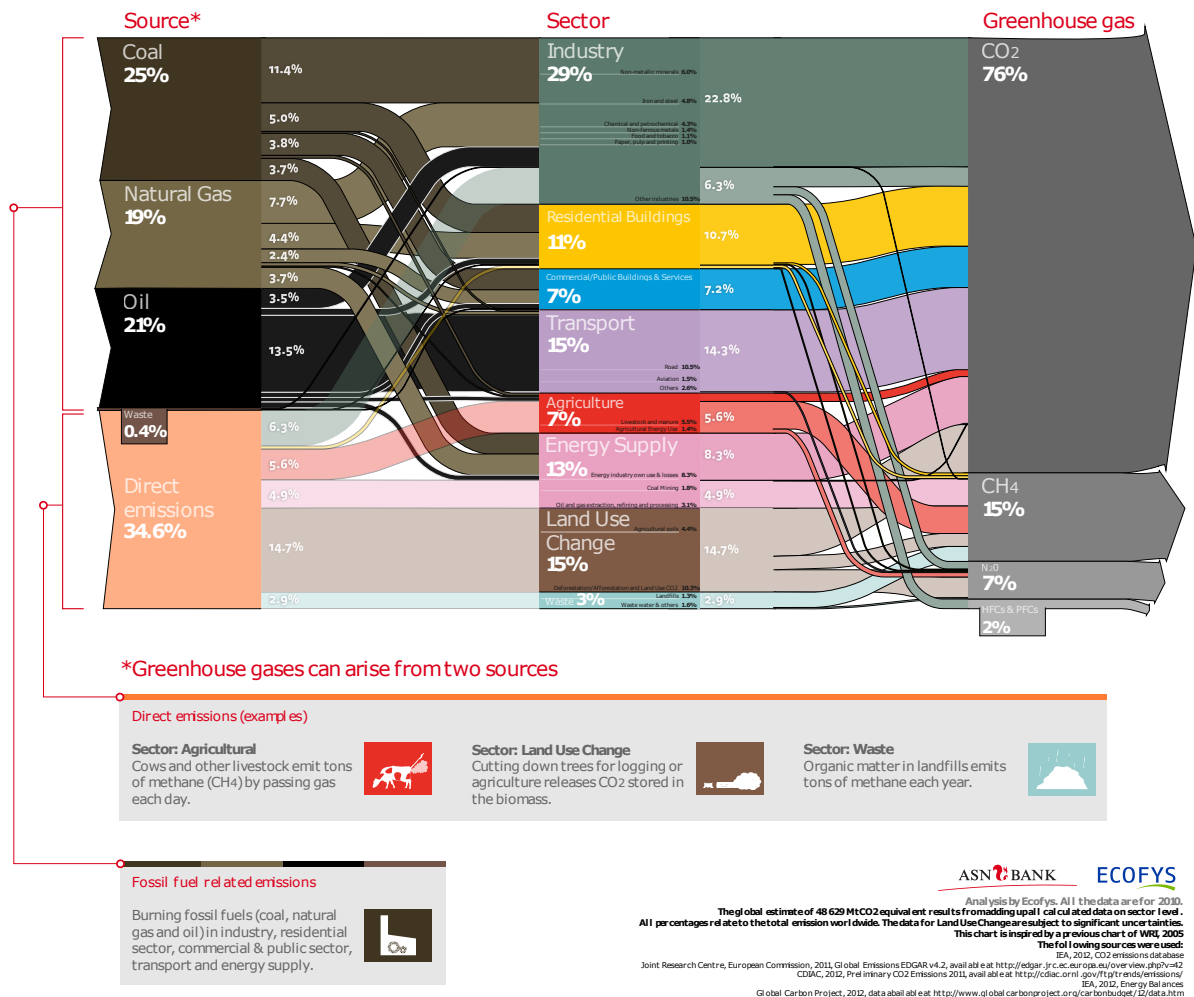


Figura 20. Diagrama de flujo de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero. Fuente: ECOFYS. <http://bit.ly/2AwkICXk>

and storage” que puedes encontrar en el siguiente enlace: <https://bit.ly/1NTnK2F>

Importante 1.17: CO₂ en la actualidad: efectos del COVID-19

La ?? muestra la evolución de las variaciones en las emisiones de CO₂ en los últimos años. Lógicamente sería esperable que la pandemia de COVID-19 haya tenido algún impacto en este ámbito: ¿qué puede deducirse en este sentido de la gráfica de la ???

Importante 1.18: Cambio Climático: ¿Demasiado tarde?

Según algunos estudios, parece que los esfuerzos y acuerdos implementados hasta el momento no están siendo suficientes e incluso parece que el momento en el que se llegará a un calentamiento medio de +1,5°C se acerca cada vez más. Como se explica en el tweet del enlace adjunto, la fecha prevista para llegar a ese calentamiento era originalmente le 2045, pero nuevos estudios lo sitúan ahora en el 2034.

Enlace al tweet: bit.ly/3Tr4b6y

The increase in carbon emissions in 2021 was driven by the rebound in economic growth

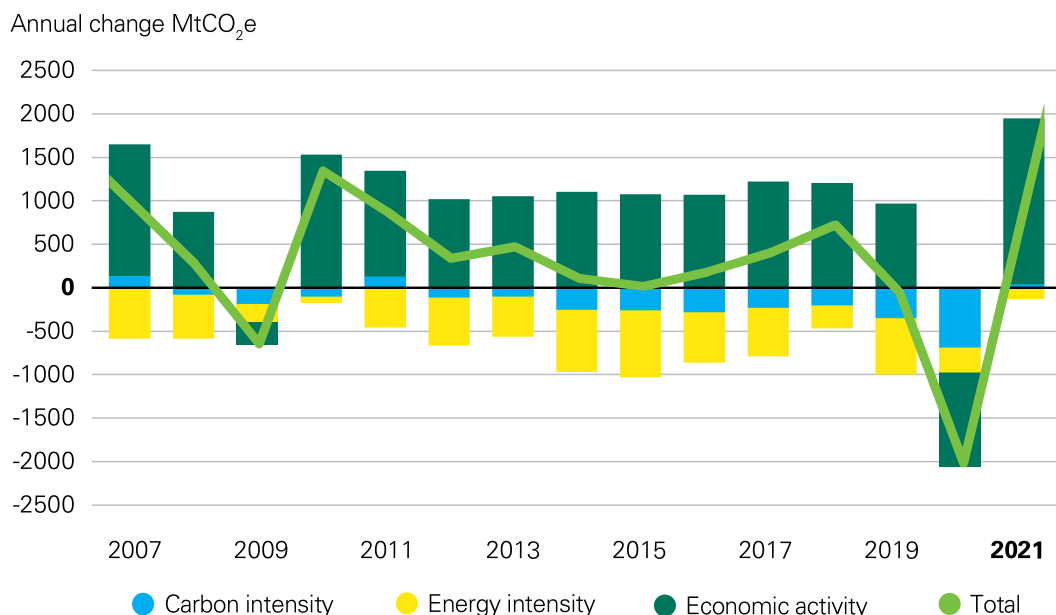


Figura 21. Evolución de las emisiones de CO₂ hasta 2021. Fuente: Statistical Review of World Energy 2022. Enlace: <https://on.bp.com/3MOQk8q>



Crespo @QuantumFracture · 8 ene.

No. Vosotros generáis **debate**.

En los círculos científicos el **cambio climático** es una realidad. Sois vosotros difundiendo fake news y dando voz a charlatanes los que generáis duda.

Lean la literatura científica de verdad en vez de noticias de periódico sesgadas y malinterpretadas

92

603

3,6 mil



Pablo Rodríguez Ros @pablorros_ · 24 ene.

"Cualquier **debate** público sobre la realidad física del **cambio climático** no es un **debate**, es sencillamente tiempo y atención que los negacionistas consiguen a costa de quienes nos tomamos esto en serio."

Figura 22. Tweets de @QuantumFracture y @pablorros sobre el debate generado en relación al cambio climático).

Importante 1.19: Cambio Climático: ¡Twitter y polémicas!

Está claro, el tema del cambio climático levanta pasiones y qué mejor plataforma para expresar esas opiniones que **Twitter**. A continuación te dejo algunos tweets interesantes donde la **comunidad científica** muestra su hartazgo a que se generen "**falsos debates**" ...

Enlaces:

<https://bit.ly/3sWMXSK>

<https://bit.ly/3c9sHr2>

<https://bit.ly/2Mnxg6c>

<https://bit.ly/2Msvfpb>

<https://bit.ly/2KNzV8L>

1.7. Panorama Actual: EERR en el contexto mundial

Una vez revisados algunos conceptos básicos como la definición de energías renovables, el porqué de su origen y de su relevancia en la sociedad actual, ha llegado el momento de revisar la situación actual de las energías renovables en el marco del sector energético mundial y en nuestro país.

Vamos a revisar los actores principales del sector, así como a ver qué peso tienen las energías renovables dentro de la generación eléctrica en España, la relevancia de cada renovable y algunos conceptos básicos para entender mejor la situación regulatoria actual.

Un primer dato importante, que de hecho ya hemos analizado en cierta medida en el apartado 1.5.4, es la relevancia de las **EERR en la cobertura a nivel mundial del consumo final de energía** (podemos entenderlo como la cobertura de energía primaria).

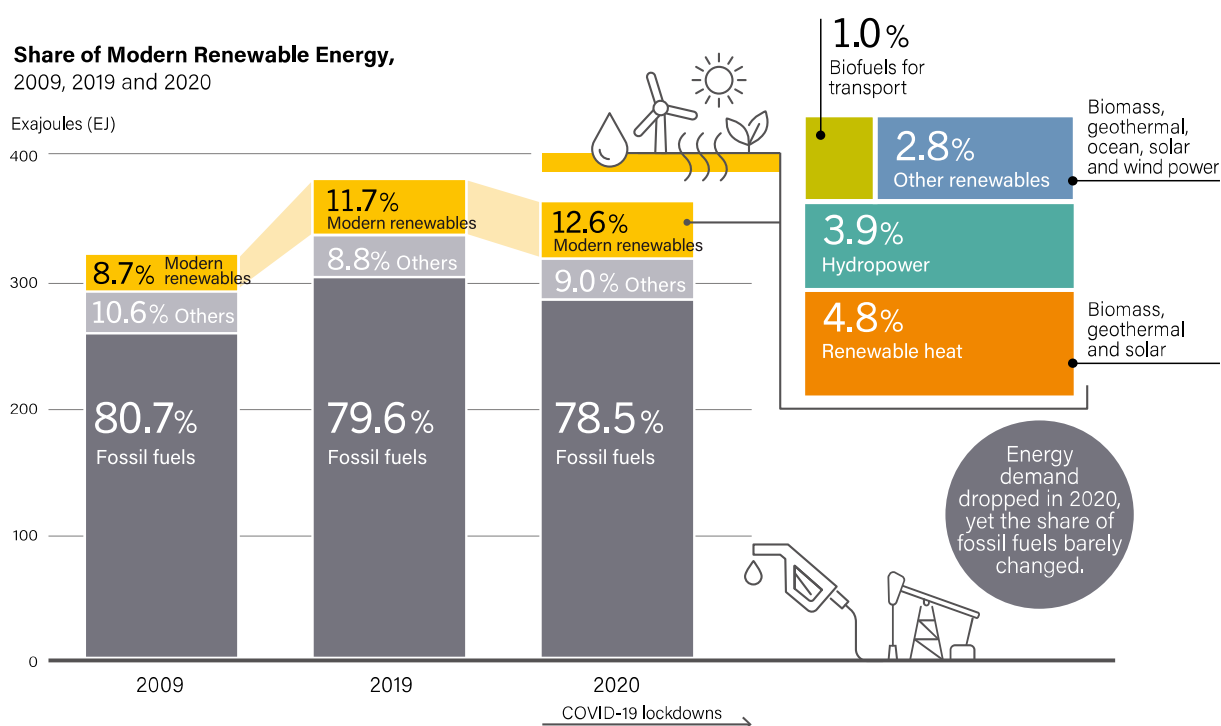


Figura 23. Cobertura de las EERR en relación al consumo global de energía primaria (2010-2020). Fuente: REN21 (2022 Report). Enlace: <https://bit.ly/3MR1R7x>.

La primera cifra a tener en cuenta es que el **78,5 % de la cobertura global de energía primaria** se lleva a cabo mediante el uso de **combustibles fósiles** (petróleo, gas natural, carbón ...). Vemos también que las denominadas **renovables modernas** contribuyen con un **12,6 %**, pero también es interesante analizar cómo contribuye cada una de las tecnologías renovables: la suma de las energías **eólica, solar, biomasa, geotermia y energías del mar** contribuyen con un **2,8 %**. La **hidráulica** con un **3,9 %**, mientras que las tecnologías de **biomasa, solar y geotermia usadas para aplicaciones térmicas** (generar calor para el agua caliente sanitaria o la calefacción, por ejemplo) llegan a un **4,8 %**.

¿Cómo varía la contribución de las EERR si en vez de hablar de energía primaria nos centramos en la **cobertura de la demanda de energía eléctrica**? Las cifras son similares

Share of Renewable Energy in Electricity Generation,
2011 and 2021

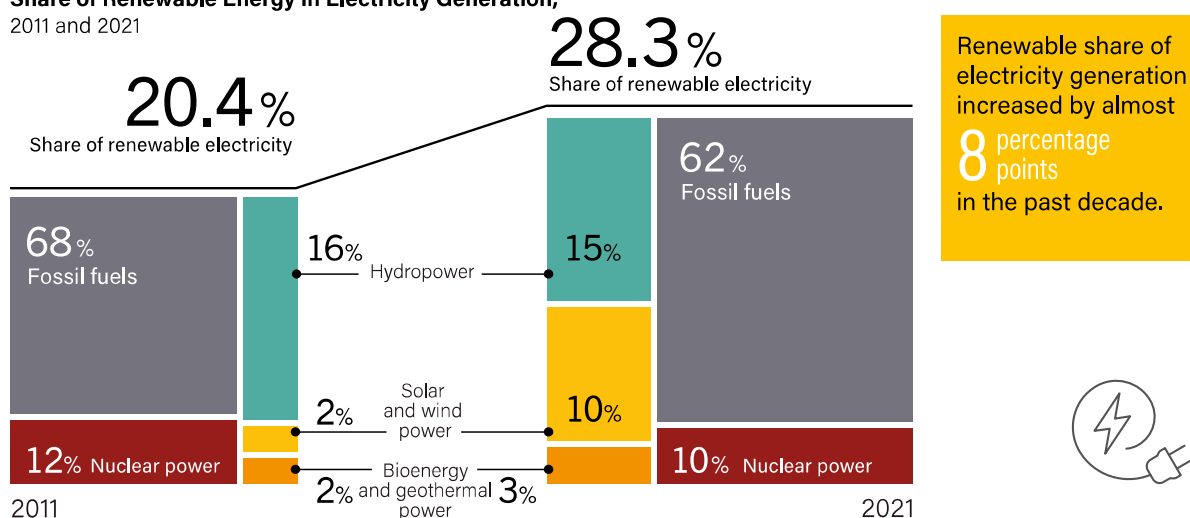


Figura 24. Cobertura de las EERR en relación al consumo global de energía eléctrica (final-2021).
Fuente: REN21 (2022 Report). Enlace: <https://bit.ly/3MR1R7x>.

en lo referente al reparto entre combustibles fósiles y **energías renovables**, aunque la contribución de estas últimas aumenta en este caso hasta un **28,3 %**. También varía de manera significativa el reparto dentro de ese 28,3 %¹ de generación eléctrica renovable. Por otro lado, la contribución de las tecnologías EERR es muy diferente, con un notable predominio de la **hidráulica**² (**15 %**, sección verde en el gráfico), seguida de la **energía eólica** y la **solar fotovoltaica (FV)** que suman un 10 %).

Al margen de los datos “brutos”, también resulta fundamental el comprender las **tendencias de crecimiento en los últimos años de las diferentes tecnologías renovables**. Este análisis nos aporta información sobre la relevancia de cada una de estas tecnologías y sobre su **madurez tecnológica**.

Importante 1.20: 2021: nuevas centrales para generación eléctrica

Una buena manera de comprender la relevancia actual de las EERR para la generación de electricidad se muestra en la **Figura 25**, donde podemos ver que durante 2021 el **84 %** de la nueva potencia instalada está asociada a energías renovables.

La **Figura 26** muestra las **inversiones en tecnologías renovables** a lo largo de los últimos años. Hay dos tecnologías que destacan claramente sobre el resto: la energía eólica y, aún en mayor medida, la energía solar fotovoltaica.

¹Un dato interesante es que la contribución para 2011 fue del **20.4 %**, lo que permite inferir la tendencia de crecimiento de la contribución de las energías renovables en los últimos años.

²*Hydropower* se refiere a la potencia derivada de la energía de agua que cae (presas) o agua que corre rápidamente (cauces de ríos).

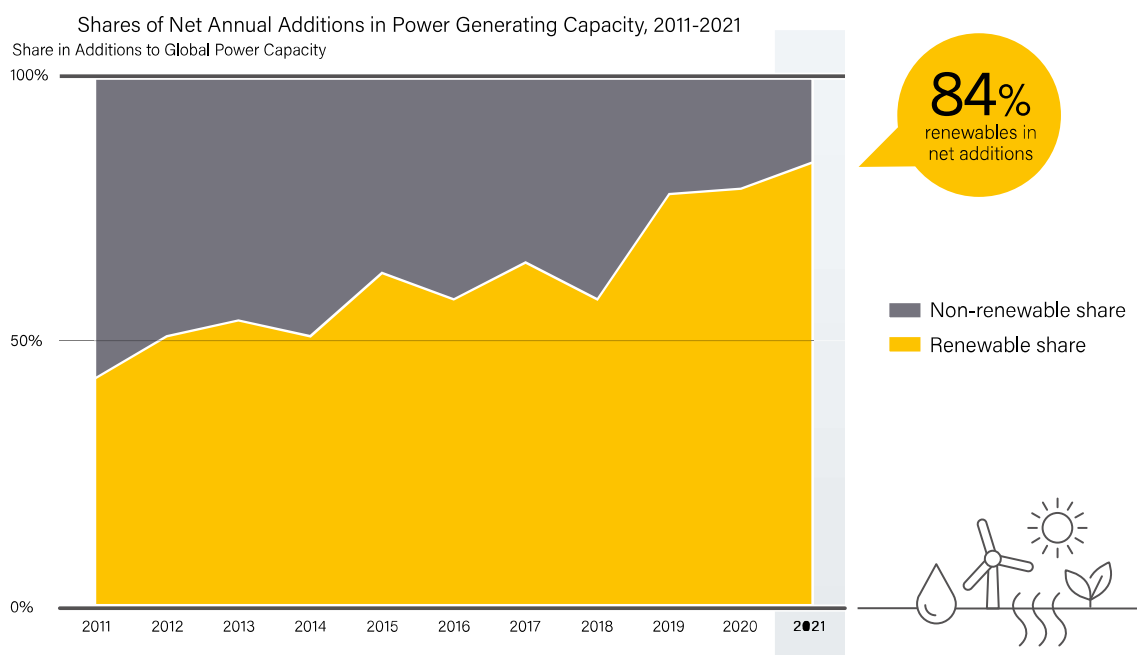


Figura 25. Evolución de la potencia instalada para generación eléctrica anual (2011-2021). Fuente: REN21 (2022 Report). Enlace: <https://bit.ly/3MR1R7x>.

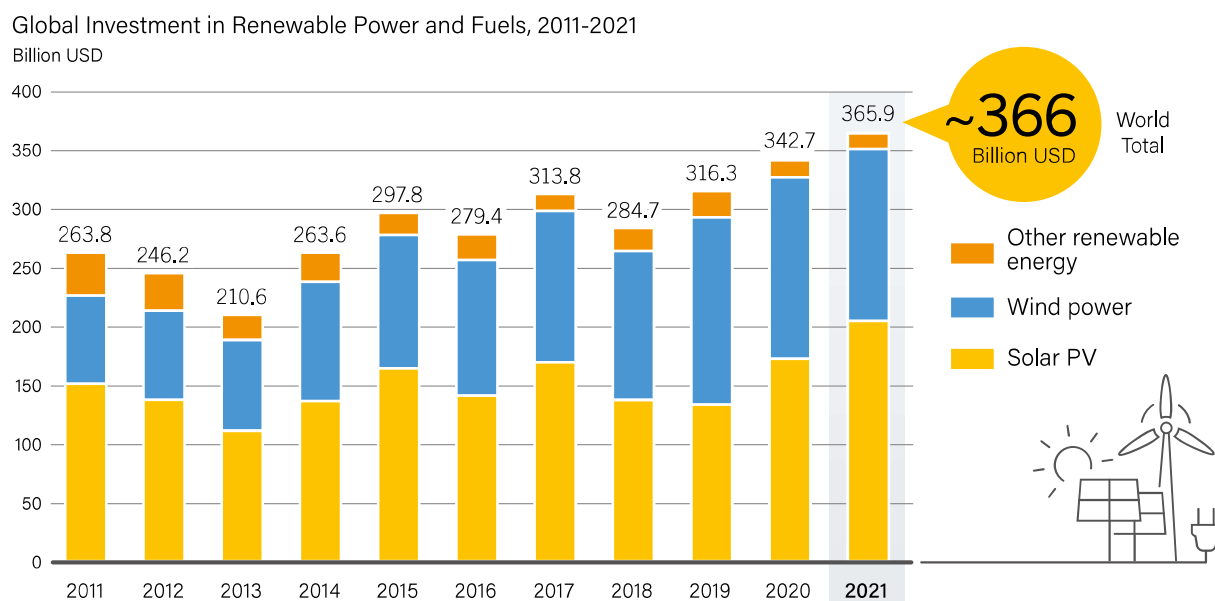


Figura 26. Nuevas inversiones globales en energías renovables por tecnología (2021). Fuente: REN21 (2022 Report). Enlace: <https://bit.ly/3MR1R7x>.

Veamos ahora cuáles son los principales “actores” en el contexto internacional. La [Figura 27](#) muestra **los 5 primeros países en capacidad total instalada o generación para las diferentes tecnologías** (datos actualizados a finales de 2019).

Del análisis de estos datos puede deducirse que tanto **China** como **USA** son los principales actores a nivel mundial, ocupando las 2 primeras posiciones para diferentes tecnologías. Sin embargo, estamos hablando de países con una gran extensión geográfica y demográfica.

Total Power Capacity or Demand / Output as of End-2021Countries in **bold** indicate change from 2020.

	1	2	3	4	5
POWER					
Renewable power capacity (including hydropower)	China	United States	Brazil	India	Germany
Renewable power capacity (not including hydropower)	China	United States	Germany	India	Japan
Renewable power capacity <i>per capita</i> (not including hydropower) ¹	Iceland	Denmark	Germany	Sweden	Australia
 Bio-power capacity	China	Brazil	United States	India	Germany
 Geothermal power capacity	United States	Indonesia	Philippines	Turkey	New Zealand
 Hydropower capacity ²	China	Brazil	Canada	United States	Russian Federation
 Solar PV capacity	China	United States	Japan	India	Germany
 Concentrating solar thermal power (CSP) capacity	Spain	United States	China	Morocco	South Africa
 Wind power capacity	China	United States	Germany	India	Spain
HEAT					
 Solar water heating collector capacity ³	China	United States	Turkey	Germany	Brazil
 Geothermal heat output ⁴	China	Turkey	Iceland	Japan	New Zealand

Figura 27. 5 primeros países en capacidad total instalada o generación para las diferentes tecnologías (datos actualizados a finales de 2021). Fuente: REN21 (2022 Report). Link: <https://bit.ly/3MR1R7x>.

Alemania, India y Japón muestran también cifras muy relevantes en este sentido, así como Brasil si se considera la energía hidráulica.

En cuanto a las diferentes tecnologías, **China** aparece como el primer país en capacidades **hidroeléctricas, solares fotovoltaicas y eólicas**, así como en **solar térmica y geotermia**. Sin embargo, las enormes dimensiones de este país pueden dar lugar a una cierta distorsión de estos datos. En este sentido, un análisis de los valores de *per cápita*¹, podría proporcionar información adicional interesante. Por ejemplo, los tres países principales en términos de **total capacidad de energía renovable son China, USA y Alemania**; sin embargo, si analizamos la **capacidad de energía renovable *per cápita***, entonces los países líderes son Islandia, Dinamarca y Alemania. **España** aparece como el primer país en **energía solar de concentración (CSP)**².

El caso de **Alemania** merece una reflexión detenida, habida cuenta de sus recursos solares (irradiancia media anual, por ejemplo) en comparación con otros países europeos como Italia o España (profundizaremos en este tema en el capítulo dedicado a la energía solar fotovoltaica). Por último, es también reseñable el hecho de que **España aparece en 5º lugar en capacidad total instalada eólica**.

¹La capacidad total por tecnología se divide por el número de ciudadanos en el país bajo análisis.

²Los sistemas CSP (Concentrating Solar Power, Solar Térmica de Concentración) generan energía solar mediante el uso de espejos o lentes para concentrar una gran cantidad de luz solar en un área pequeña. La electricidad se genera cuando la luz concentrada se convierte en calor, lo que impulsará un motor térmico (generalmente una turbina de vapor) conectado a una fuente de energía eléctrica.

Acabamos de ver que las EERR más importantes a nivel de inversiones en los últimos años son la energía eólica y la solar fotovoltaica. Vamos a analizar brevemente la evolución de ambas en los últimos años. Si nos fijamos primero en el caso de la solar FV (Figura 28), podemos ver como **la evolución de las instalaciones fotovoltaicas ha seguido un patrón de fuerte crecimiento en los últimos años**, siendo el actor principal **China** y, bastante por detrás, USA, India y Japón.

Solar PV Global Capacity and Annual Additions, 2011-2021

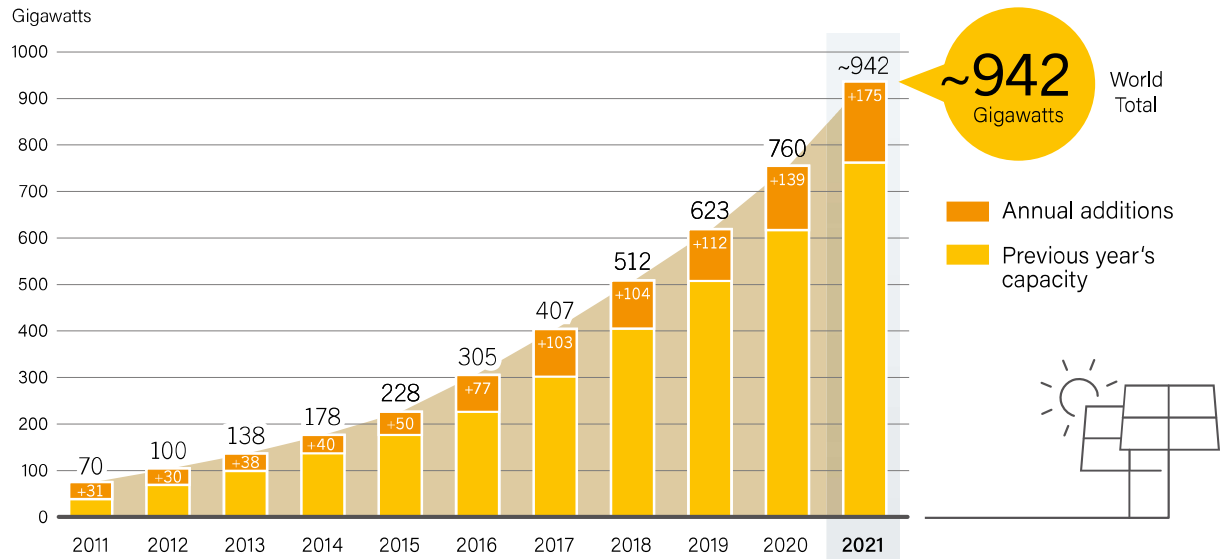


Figura 28. Evolución de la potencia solar fotovoltaica instalada entre los años 2011 y 2021. Fuente: REN21 (2022 Report). Enlace: <https://bit.ly/3MR1R7x>.

Solar PV Capacity and Additions, Top 10 Countries for Capacity Added, 2021

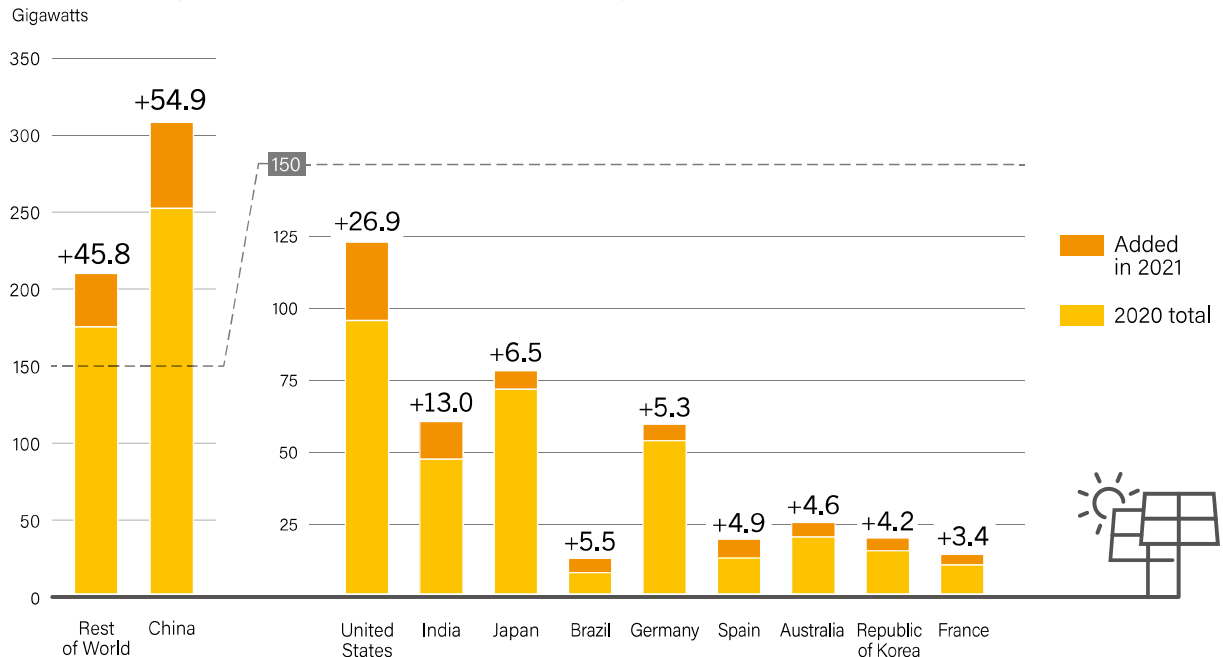


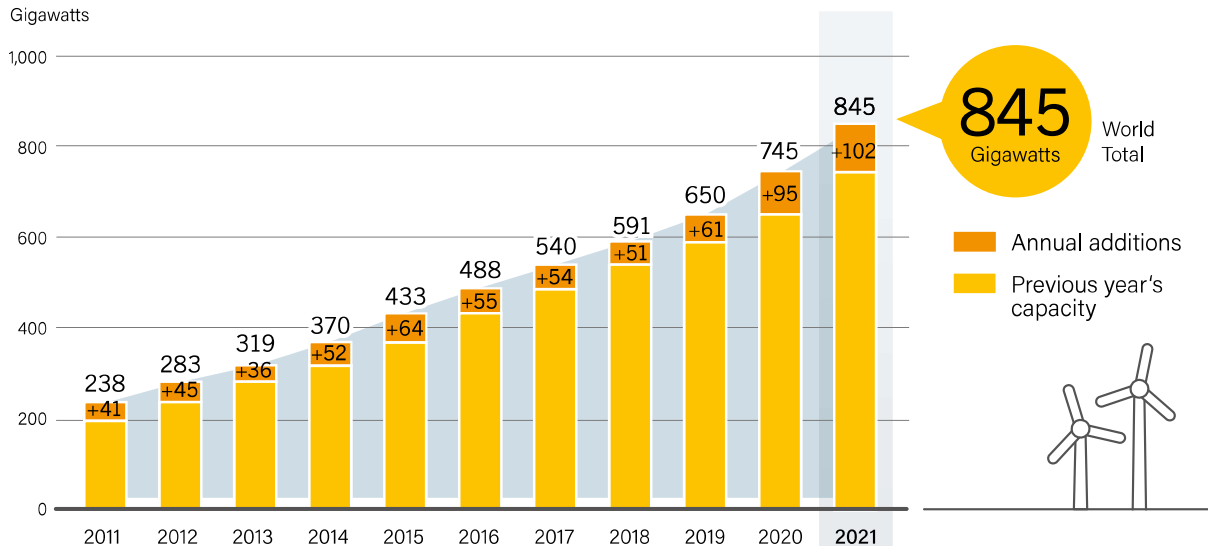
Figura 29. Potencia solar FV de los 10 países líderes y potencia añadida en 2021. Fuente: REN21 (2022 Report). Enlace: <https://bit.ly/3MR1R7x>.

Importante 1.21: Solar FV en China

China ha instalado más potencia solar FV en 2021 que ... ¡el resto de países juntos!

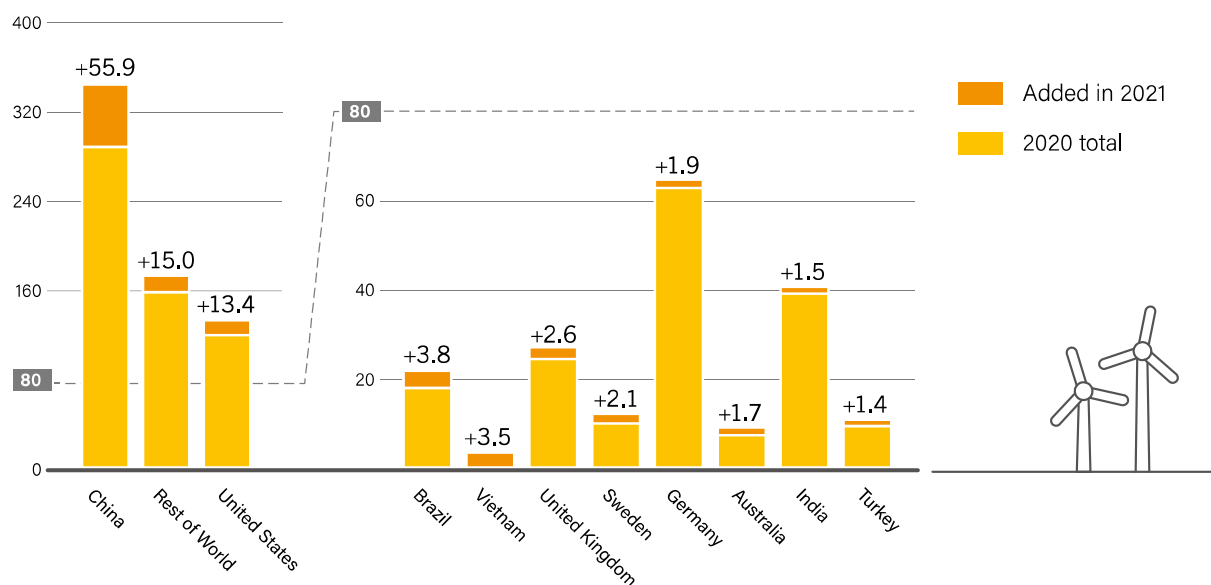
Wind Power Global Capacity and Annual Additions, 2011-2021

Gigawatts

**Figura 30.** Evolución de la capacidad eólica instalada entre los años 2011 y 2021. Fuente: REN21 (2022 Report). Enlace: <https://bit.ly/3MR1R7x>.

Wind Power Capacity and Additions, Top 10 Countries for Capacity Added, 2021

Gigawatts

**Figura 31.** Incremento en la capacidad eólica instalada en los primeros 10 países en 2021. Fuente: REN21 (2022 Report). Enlace: <https://bit.ly/3MR1R7x>.

Analicemos ahora la evolución de la **energía eólica**. Al igual que en el caso fotovoltaico, el crecimiento en la última década ha sido muy significativo, con incrementos en la capacidad total mundial instalada muy notables en los últimos años (Figura 30). Es interesante

destacar que, aunque hablamos también de un fuerte crecimiento, la tendencia de la curva de crecimiento es claramente distinta en este caso frente a la solar FV: en este caso nos aproximamos más a un crecimiento lineal, frente a un ajuste más bien exponencial en el caso de la solar FV.

Si nos centramos ahora en el crecimiento eólico de los 10 actores principales a nivel mundial (Figura 31) vemos como **España** aparece situada en este caso en quinto lugar entre Holanda y Alemania.

1.8. Situación actual de las EERR: contexto europeo

Como acabamos de ver, la situación y evolución de las EERR es completamente distinta según el país/región analizado. La situación en la **Unión Europea (UE)** viene determinada por sus políticas que, orientadas a estimular el despliegue de estas tecnologías, han fijado dos objetivos genéricos para la participación en el consumo total de energía final (**20 %**) y la producción de electricidad (**40 %**) en los últimos años. Los países de la UE han establecido sus propios objetivos para cumplir con este objetivo común (para el consumo de energía final), como se representa en Figura 32. En esta figura, la participación de las energías renovables en el consumo de energía final de cada país se ha indicado en azul oscuro, mientras que la meta para 2020 se ha representado con una línea naranja.

Aparte de las políticas de cada país, las diferencias se derivan de variaciones en la disponibilidad de recursos naturales (por ejemplo, potencial para construir centrales hidroeléctricas). Todos los miembros de la UE han aumentado su cuota de energía renovable entre 2004 y 2020, y diecisiete han duplicado al menos su cuota¹.

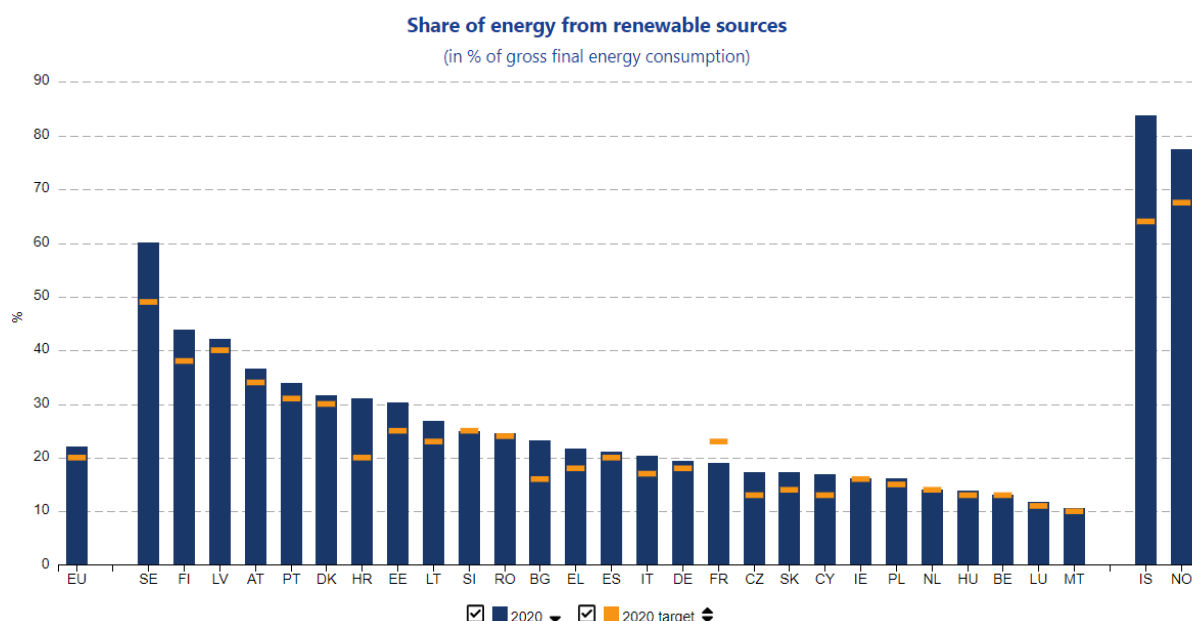


Figura 32. Contribución de las EERR al consumo final de energía en la UE-28 (2020). Fuente: Eurostat. <http://bit.ly/2uBLPdq>.

¹Fuente: Eurostat. Enlace: <http://bit.ly/2uBLPdq>

Algunos países han decidido establecer objetivos más exigentes (Suecia, Finlandia, Letonia, Dinamarca, Austria), aunque **Islandia y Noruega** (países no miembros de la UE), destacan en la lista **con cuotas actuales de alrededor del 70 %**. España se sitúa en el punto medio con un objetivo del 20 % y una cuota actual por encima del 16 %.

Importante 1.22: EERR en la UE: ¿próximos objetivos?

El nuevo objetivo de la UE para 2030 es el **32 %** (objetivo actualmente en revisión).

1.9. Panorama Actual: EERR en España

Como se ya mencionó anteriormente, en España el **IDAE** es el organismo encargado de establecer las políticas relacionadas con las EERR. En la actualidad el plan vigente es el Plan de Acción de Energías Renovables 2011-2020, con unos objetivos del **20.8 % de aporte de las EERR al consumo final bruto de energía** y una contribución del **40 % a la generación eléctrica**¹. En lo referente al consumo final de energía, la tendencia en España parece positiva, con un incremento del **16,2 % (2015) al 17,4 % (2016), 17,5 % (2017) y 18,4 % en 2019**.

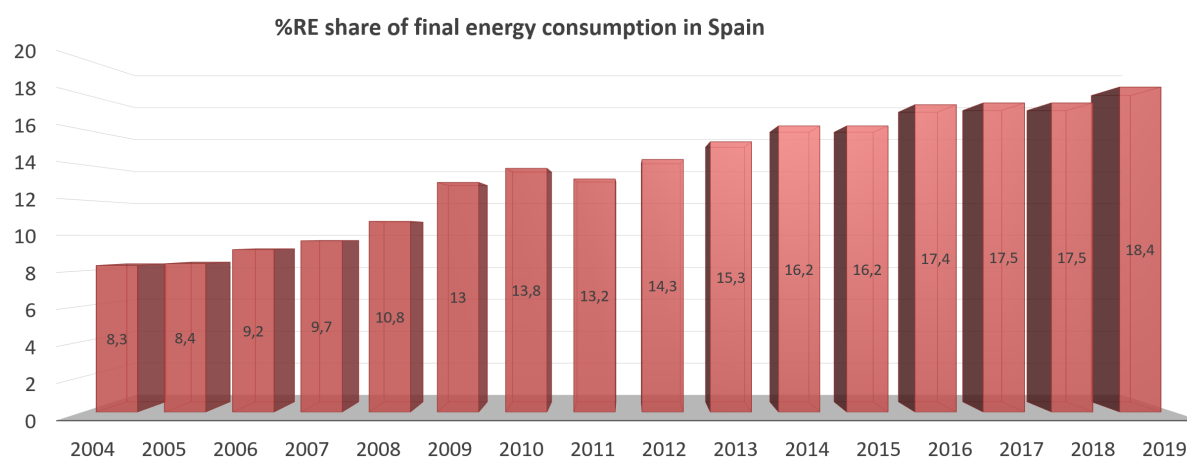


Figura 33. Evolución de la cobertura mediante EERR del consumo bruto final en España. Fuente: Eurostat (<https://bit.ly/3sS24Nc>). Elaboración propia.

Si nos fijamos ahora exclusivamente en la generación de energía eléctrica en nuestro país, el panorama cambiará significativamente. En primer lugar, la contribución de las EERR sube de manera notable, situándose en el **entorno del 50 %** en los últimos años (ver Figura 34), llegando a un **48,4 % en 2021**.

En el marco del cambio climático ya tratado en este curso, es importante destacar que **estas variaciones en la contribución de las EERR tienen un reflejo directo en las**

¹Los datos que se presentan en estos apuntes se encuentran actualizados a los últimos disponibles. El hecho de que los datos asociados al consumo final de energía se refieran, como en este caso, a años anteriores (2019, frente a 2020 para generación eléctrica) se debe a la dificultad que tienen los organismos oficiales para obtenerlos.

% Evolución de la generación renovable y no-renovable en España

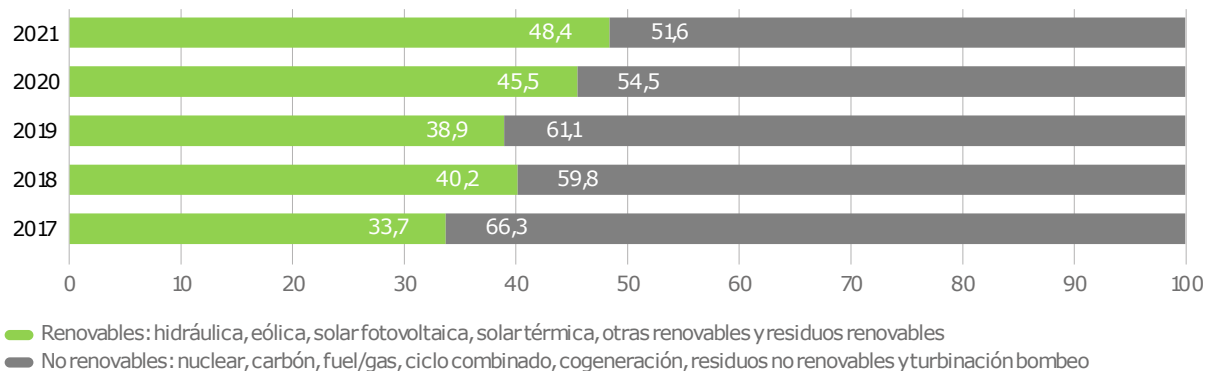


Figura 34. Evolución de la contribución de fuentes renovables y no-renovables (2021). Fuente: REE: “El sistema eléctrico español: previsión de cierre 2021” . <https://bit.ly/3oalRUI>

emisiones de gases de efecto invernadero, principalmente CO₂. Si comparamos la evolución de la contribución de las fuentes renovables en España en los últimos años mostrada en la [Figura 35](#) con la evolución de las emisiones de CO₂ derivadas de la producción eléctrica ([Figura 36](#)), puede apreciarse claramente como **una mayor contribución de las EERR implica un descenso en las emisiones asociadas**.

GWh Evolución de la generación eléctrica renovable en España

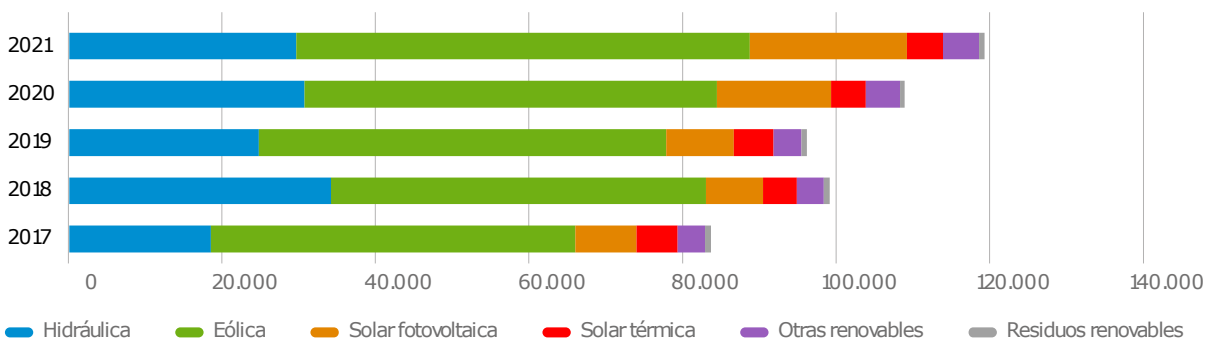


Figura 35. Evolución de la contribución de fuentes renovables a la generación eléctrica en España. Fuente: REE: “El sistema eléctrico español: previsión de cierre 2021” . <https://bit.ly/3oalRUI>

Además, resulta interesante también buscar la causa a, por ejemplo, el aumento de la contribución de las EERR en 2018 o la disminución en 2019. **¿Qué es lo que ha ocurrido? ¿Se habrán instalado/eliminado muchos “huertos” solares fotovoltaicos? ¿Los parques eólicos habrán generado más debido a un mayor número de días de vientos favorables?**

En la [Figura 35](#) se ha detallado la contribución de cada tecnología renovable en los últimos años en España. Se puede apreciar como en los años 2015 y 2017 el descenso de las renovables se debe fundamentalmente a periodos de sequía que implican una **menor producción hidráulica**. Este descenso se vio compensado fundamentalmente por un mayor uso del carbón. Del mismo modo, el aumento de la generación hidráulica del 2018 implicó un descenso en el uso de este combustible fósil. De hecho, la tendencia del **uso de carbón**

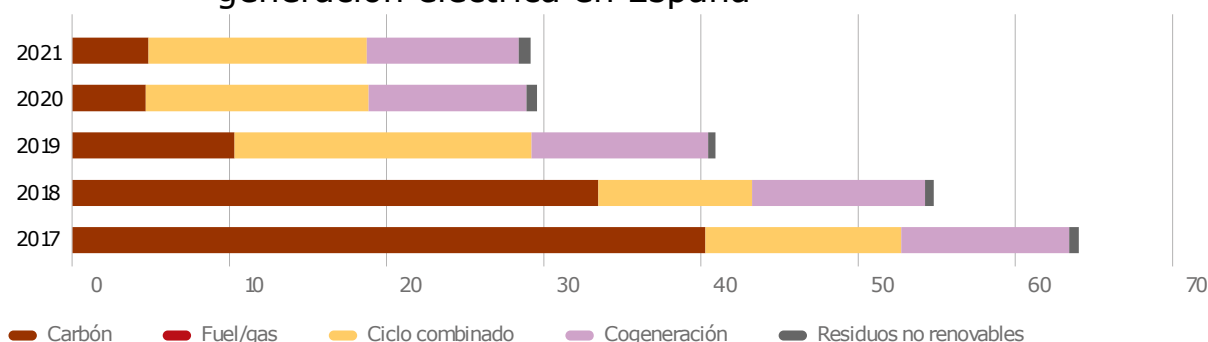
Mill.tCO₂ eq.Evolución de las emisiones de CO₂ eq. asociadas a la generación eléctrica en España

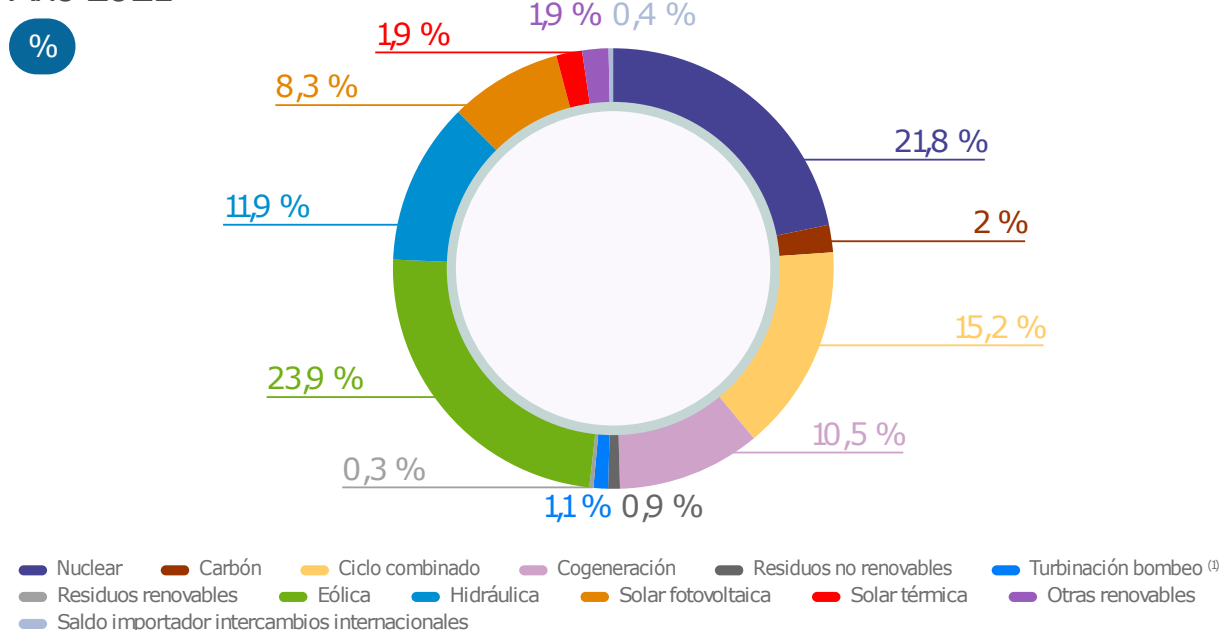
Figura 36. Evolución de las emisiones de CO₂ asociadas con la generación eléctrica en España (finales del 2021). Fuente: REE: “Avance del informe del sistema eléctrico español 2021”. <http://bit.ly/2HGg7Ac>

para generar electricidad es claramente descendente, llegando a su mínimo histórico precisamente en 2021. Vemos así como la variación en la generación hidráulica tiene un gran impacto en el mix de generación eléctrico de nuestro país.

Finalmente, si se analiza la distribución de la generación eléctrica en España en el año 2020 en su conjunto (Figura 37), se puede apreciar como la producción estuvo encabezada por la **energía eólica (23,3 %)**, seguida de la **energía nuclear (20,8 %)**, y el **ciclo combinado (17,2 %)**.

Generación Eléctrica en España

Año 2021



(1) Turbinación de bombeo puro + estimación de turbinación de bombeo mixto.

Figura 37. Generación eléctrica en España (2021). Fuente: REE: “Avance del informe del sistema eléctrico español 2021”. <http://bit.ly/2HGg7Ac>

1.9.1. ESPAÑA 2019-2022: ¡un nuevo escenario!

Como ya se comentó en las secciones anteriores, **España ha sufrido varios años de un completo estancamiento** en el desarrollo de nuevas instalaciones asociadas con ER modernas, principalmente energía eólica y solar fotovoltaica. **Este escenario cambió radicalmente en 2019 con un gran aumento en la capacidad solar fotovoltaica, así como en la energía eólica.** Esta situación se explicará en detalle en los siguientes capítulos dedicados a la energía solar fotovoltaica y eólica, pero vale la pena comentar algunas de las razones asociadas:

- Varios GW de (principalmente) energía solar fotovoltaica y eólica se adjudicaron en subastas en 2017 para instalarse antes del final del 2019 y cumplir así con los objetivos comprometidos con la UE.
- Las subastas también se han utilizado en 2020 y 2021, con las energías eólica y solar fotovoltaica recibiendo la gran mayoría de los proyectos. Estas subastas están impulsadas por los objetivos establecidos por el actual gobierno español en el **PNIEC** (Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) 2021-2030). La [Figura 39](#) muestra la evolución de la capacidad esperada para cada tecnología, siendo especialmente destacable el incremento de la eólica y la solar fotovoltaica.
- Se han implementado varias instalaciones sin estar asociadas a subastas, lo que indica que la energía solar fotovoltaica (y, por supuesto, la energía eólica) ya son competitivas en términos de costos en comparación con las tecnologías tradicionales como las derivadas de los combustibles fósiles.
- Las nuevas regulaciones también han estimulado esta actividad, por ejemplo relacionada con las instalaciones solares fotovoltaicas de autoconsumo

Como sabemos, la **pandemia de COVID** ha afectado mucho a casi todos los sectores; sin embargo, las perspectivas para las EERR siguen siendo positivas. Por ejemplo, a finales de enero de 2021 se realizó una nueva subasta donde se han asignaron **3034 MW**. En concreto, **2036 MW se asignaron a proyectos de solar FV, mientras que 998 MW a energía eólica.** La [Figura 38](#) muestra las empresas a las que se les asignaron proyectos renovables en esta subasta.

1.9.2. Panorama Actual: Conclusiones

En los últimos apartados se ha revisado la situación actual de las EERR en el contexto mundial, europeo y español. Este análisis nos ha permitido conocer las diferentes tecnologías renovables relevantes en la actualidad y su contribución a la cobertura del consumo final bruto y a la generación eléctrica.

En resumen, las nuevas incorporaciones de capacidad para la generación de energía estarán abrumadoramente dominadas por las energías renovables, con casi el 95 % del aumento en la capacidad de energía global hasta 2026 (ver [Figura 40](#)).

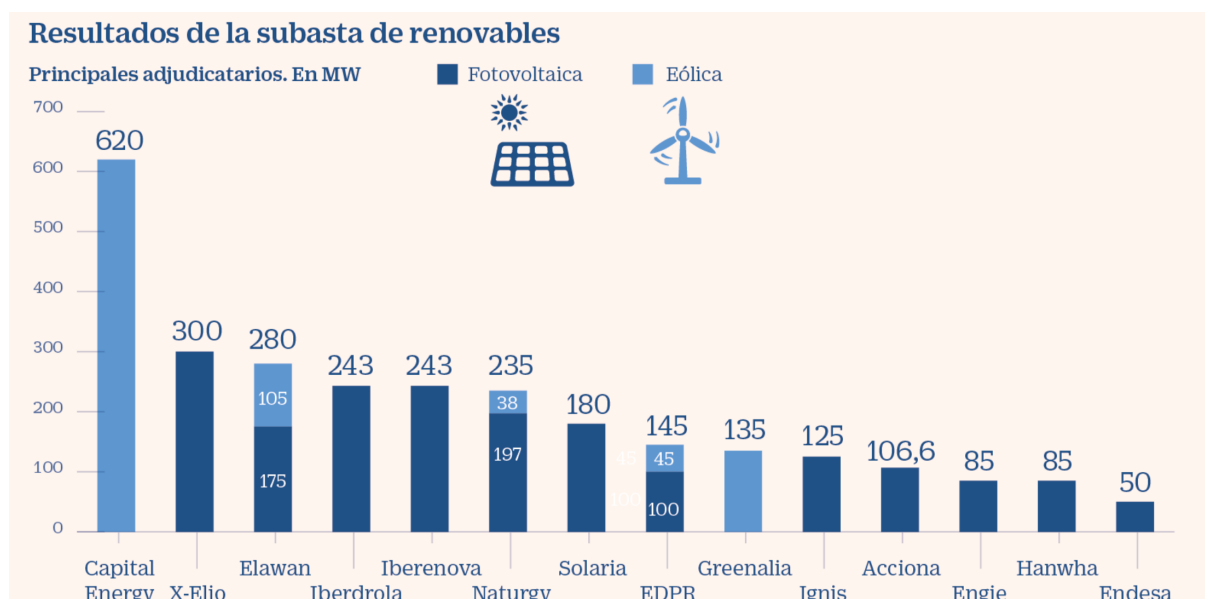


Figura 38. Distribución de MW asignados por compañías en la subasta de enero del 2021. Fuente: Belén Trincado / Cinco Días. Enlace: <http://bit.ly/3abEpyV>

Parque de generación del Escenario Objetivo (MW)				
Año	2015	2020*	2025*	2030*
Eólica (terrestre y marítima)	22.925	28.033	40.633	50.333
Solar fotovoltaica	4.854	9.071	21.713	39.181
Solar termoeléctrica	2.300	2.303	4.803	7.303
Hidráulica	14.104	14.109	14.359	14.609
Bombeo Mixto	2.687	2.687	2.687	2.687
Bombeo Puro	3.337	3.337	4.212	6.837
Biogás	223	211	241	241
Otras renovables	0	0	40	80
Biomasa	677	613	815	1.408
Carbón	11.311	7.897	2.165	0
Ciclo combinado	26.612	26.612	26.612	26.612
Cogeneración	6.143	5.239	4.373	3.670
Fuel y Fuel/Gas (Territorios No Peninsulares)	3.708	3.708	2.781	1.854
Residuos y otros	893	610	470	341
Nuclear	7.399	7.399	7.399	3.181
Almacenamiento	0	0	500	2.500
Total	107.173	111.829	133.802	160.837

Figura 39. Evolution of capacity for electricity generation in Spain according to PNIÉC. Source: Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. <https://bit.ly/3HRwPIP>

También es interesante destacar el **cambio notable que ha experimentado España desde 2019**, con un gran aumento en las capacidades de energía solar fotovoltaica y eólica. Antes de analizar en profundidad la **relación entre las EERR y las telecomunicaciones**, vamos a repasar brevemente dos aspectos fundamentales: las **políticas relacionadas con las EERR** y las **tecnologías de almacenamiento de energía en la red eléctrica**.



Figura 40. Resumen de la contribución de las EERR a la nueva capacidad instalada para generación eléctrica. Fuente: IEA. Enlace: <https://bit.ly/3IzZbrB>.

Importante 1.23: Invasión de Ucrania y crisis energética global

El mundo está experimentando ahora mismo la que probablemente sea la mayor crisis energética hasta la fecha. En la [Figura 41](#) se muestra un breve resumen (elaborado por REN21) sobre esta situación.

1.10. EERR: Políticas

A estas alturas ya tenemos un conocimiento claro sobre qué es una energía renovable, por qué surgen las EERR y sobre cómo están situadas en el contexto global y en nuestro país. Quizás sea este el momento de hacer unas breves reflexiones sobre “otros” aspectos de las EERR. Vamos a plantearnos algunas preguntas:

¿Son necesarias las EERR? Si se quiere conseguir una descarbonización¹ de nuestra sociedad en general y de nuestra generación de energía y transporte en particular, sin lugar a dudas parece que las EERR son necesarias.

¿Qué ventajas nos ofrecen las EERR? Principalmente la perspectiva de un desarrollo sostenible, lo que no parece posible con el actual modelo basado en los combustibles fósiles.

¿Presentan algún inconveniente las EERR? Es obvio que sí: su dependencia del recurso y su carácter fluctuante son una de sus principales desventajas, ya que no permiten una generación planificada y controlada. Por otro lado, estamos hablando en muchos casos de tecnologías no maduras, aunque este problema parece ya superado, al menos parcialmente, en el caso de la energía eólica o la solar FV. Esta inmadurez implica unos costes más elevados y una necesaria inversión en I+D.

¿Por qué no somos ya 100 % renovables? La transición hacia un modelo 100 % renovable no es sencilla. Para empezar tenemos que disponer de los recursos (Sol, viento, olas,

¹Eliminar la dependencia de los combustibles fósiles.

01 GLOBAL OVERVIEW



Renewables experienced yet another year of record growth in power capacity, despite aftershocks from the pandemic and a rise in global commodity prices that upset renewable energy supply chains and delayed projects. The role of renewables in improving energy security and sovereignty by replacing fossil fuels became central to discussions, as energy prices increased sharply in late 2021 and as the Russian Federation's invasion of Ukraine unfolded in early 2022.

Investment in renewable power and fuels rose for the fourth consecutive year, reaching USD 366 billion, and a record increase in global electricity generation led to solar and wind power providing more than 10% of the world's electricity for the first time ever. Strong market rebounds for solar thermal and biofuels, following declines in 2020, improved the outlook for renewables in heating and transport. Strengthened political commitments and rapid growth in sales of heat pumps and electric vehicles also led to increased renewable electricity use in these sectors.

At the same time, diverse factors continued to slow the global shift to renewable-based energy systems. A rebound in worldwide energy demand, which increased an estimated 4% in 2021, was met largely with coal and natural gas and led to record carbon dioxide emissions (up 6%, adding more than 2 billion tonnes). Large sums also continued to be invested in and to subsidise fossil fuels, with the USD 5.9 trillion in subsidies spent in 2020 equivalent to roughly 7% of global gross domestic product.

Similar to past years, the highest share of renewable energy use (28%) was in the electricity sector; however, electrical end-uses accounted for only 17% of total final energy consumption (TFEC). The transport sector, meanwhile, accounted for an estimated 32% of TFEC and had the lowest share of renewables (3.7%). The

remaining thermal energy uses, which include space and water heating, space cooling, and industrial process heat, represented more than half (51%) of TFEC; of this, renewables supplied 11.2%.

As of 2020, modern renewable energy accounted for an estimated 12.6% of TFEC, nearly one percentage point higher than in 2019, as the temporary reduction in energy demand during 2020 favoured higher shares of renewables, while the share of fossil fuels barely changed.

The slow progress in energy conservation, energy efficiency and renewables prevents the transition away from fossil fuels that is necessary to meet global energy demand and reduce greenhouse gas emissions. A structural shift in the energy system is increasingly urgent. An energy-efficient and renewable-based economy is a game changer for a more secure, resilient, low-cost – and sustainable – energy future.

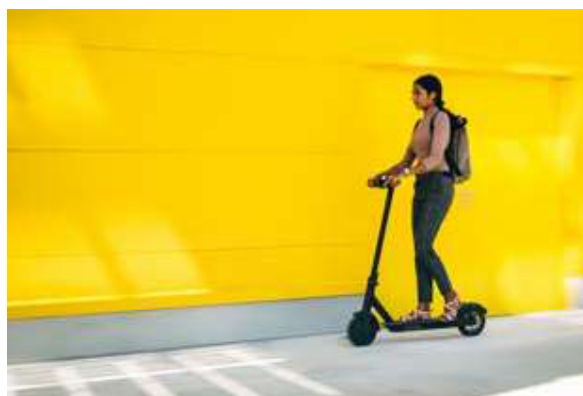


Figura 41. Resumen de la situación actual del sector energético. Fuente: REN21 (2022 Report).
Enlace: <https://bit.ly/3MR1R7x>.

mareas, etc.) necesarios. Por otro lado hay que sufragar el coste de estas instalaciones que, en muchos casos, pueden ser más caras que las convencionales (en ejemplos como la energía solar FV o la eólica ya se ha llegado a la **paridad de red**: coste de generación igual o inferior a las tecnologías convencionales). Además, la intermitencia del recurso puede hacer necesario recurrir a otras tecnologías, como la nuclear, que ofrezcan una generación continua y controlada, al menos mientras no existan tecnologías que permitan la acumulación de grandes cantidades de energía en la red eléctrica.

¿Quién paga el coste de las EERR? Esta es una pregunta importante y de gran vigencia en nuestro país. Las EERR han necesitado (y necesitarán en el caso de, por ejemplo, las energías derivadas del mar) un impulso inicial. Pensemos en la energía FV hace unos años, cuando los precios de los paneles FV eran mucho más caros que ahora (muy por encima de 1euro/Wp) y realizar una planta de generación FV no era rentable. ¿Quién iba a realizar este tipo de instalaciones si con ellas no se conseguía un retorno económico? La respuesta vino dada en forma de las famosas **primas a las EERR**.

Importante 1.24: Paridad de Red / Grid Parity

La **paridad de red** ocurre cuando una fuente de energía alternativa es capaz de generar energía a un coste normalizado (LCOE) igual o menor que el coste generalista ofrecido por la red eléctrica. Este término se utiliza especialmente en relación a las EERR, por ejemplo a la energía solar fotovoltaica y la eólica.

Importante 1.25: LCOE: Levelized Cost of Energy / Coste Normalizado de la Energía

LCOE es un parámetro que permite una comparación directa entre diferentes tecnologías y que mide los costes asociados a una determinada planta de generación (durante todo su periodo de vida estimado: costes de fabricación, de mantenimiento, de operación, etc.) divididos entre la producción de energía total. Sus unidades son \$/Wh.

Cuestión 1.11: ¿Son necesarias las EERR? (400 XP)

En el contexto de este curso damos por hecho la importancia y relevancia de las renovables en el presente y en el futuro cercano del panorama energético mundial.

Sin embargo, como es lógico, existen voces discrepantes, como ocurre con la siguiente charla TED: <https://youtu.be/N-yALPEpV4w>.

Tras ver la charla, resume brevemente la opinión del ponente, los principales inconvenientes de las EERR según su opinión, y tu propia opinión al respecto: ¿compartes el criterio de Michael Shellenberger?



Figura 42. Charla TED “Why renewables can’t save the planet”. Fuente: YouTube <https://youtu.be/N-yALPEpV4w>

1.10.1. “Primas” a las EERR

Las denominadas comúnmente como **primas** a las EERR son un régimen de retribución especial que algunos gobiernos han usado para estimular el desarrollo e implementación de ciertas tecnologías renovables en sus respectivos países.

La idea es sencilla: supongamos que es el año 2007 y yo quiero favorecer el desarrollo de la energía FV en mi país, pero me encuentro con el problema de que esta tecnología no es aún lo suficientemente madura como para que las empresas apuesten por ella, ya que sencillamente no sale rentable. El coste de estas instalaciones es muy alto y, desde el punto de vista de negocio, es preferible apostar por una central térmica o de ciclo combinado, por ejemplo.

¿Qué puede hacerse? El gobierno correspondiente puede tratar de estimular esa tecnología mediante primas, esto es, asegurando a las empresas un precio superior al de mercado (si el kWh se paga a X, el kWh fotovoltaico se paga (por ejemplo) a 5X). Este enfoque ha sido el que adoptaron muchos países, como Alemania, España, Italia.

Veamos el caso de España: los Reales Decretos RD 661/2007 y 1578/2008 fijan las retribuciones especiales para las EERR y para los sistemas de cogeneración (ver [Figura 43](#)). Como vemos en el RD 2008, las primas a energía FV fueron las más altas, estableciéndose una diferenciación en función de la potencia de la instalación y de su tipología: instaladas sobre tejado (*Rooftop*) o sobre el suelo, en formato “huerto solar” (*Ground-mounted*).

RD 661/2007

Energy Source ▲	Feed-in Tariff ◆
Biomass and biogas Sort descending	up to 13.06 c€/kWh for the first 15 years
Cogeneration systems	maximum FiT of 13.29c€/kWh during lifetime of system.
Geothermal, wave, tidal and sea-thermal	6.89 c€/kWh for the first 20 years
Hydroelectric	7.8 c€/kWh for the first 25 years
Solar thermoelectric	26.94 c€/kWh for the first 25 years
Waste combustion	up to 12.57 c€/kWh for the first 15 years
Wind systems	up to 7.32 c€/kWh for the first 20 years

RD 1578/2008

Rooftop/BIPV		Ground-mounted		Term
Size	Incentive	Size	Incentive	
1-20kW	0.34€/kWh	1-10MW	0.32€/kWh	25 años
20kW-2MW	0.31€/kWh			

Figura 43. Retribuciones a las EERR según los Reales Decretos RD 661/2007 y 1578/2008 (Elaboración propia).

Un primer punto a destacar es que, en el caso FV, estas retribuciones parecen querer estimular sólo las instalaciones conectadas a red, dejando de lado las autónomas o aisladas (lo veremos en su momento en el apartado dedicado a la energía solar).

Por otro lado, ¿son precios razonables o quizás muy elevados? La historia ya tiene una respuesta para esta pregunta, probablemente causada también por el contexto de la grave crisis económica que comienza en los años 2007/08: la retribución fue probablemente excesiva, teniendo en cuenta que reales decretos posteriores rebajaron sustancialmente su cuantía, incluso con efecto retroactivo¹, anulándose posteriormente la posibilidad de beneficiarse de este régimen a nuevas instalaciones.

Cuestión 1.12: Primas a la FV (300 XP)

Desde el punto de vista cuantitativo, las primas establecidas en el RD 2008: ¿son altas o bajas? Justifica tu respuesta con datos del coste de la electricidad en España en el 2008 y en la actualidad.

En este punto también es interesante tomar otras referencias, por ejemplo el caso italiano. Si analizamos las primas (*feed-in tariff*) aplicadas en Italia vemos como su cuantía es sensiblemente inferior, existe una mayor categorización por potencias (y tecnologías innovadoras, no mostradas en esta figura) y se diferencia entre instalaciones aisladas (*self-consumption*) y conectadas a red (*standard feed-in*) (ver Figura 44).

Standard self-consumption tariff

Rooftop/BIPV		Ground-mounted		Term
Size	Incentive	Size	Incentive	
1-3kW	0.100€/kWh	1-3kW	0.094€/kWh	20 years
3-20kW	0.089€/kWh	3-20kW	0.083€/kWh	20 years
20-200kW	0.075€/kWh	20-200kW	0.069€/kWh	20 years
200kW-1MW	0.048€/kWh	200kW-1MW	0.042€/kWh	20 years
1MW-5MW	0.036€/kWh	1MW-5MW	0.031€/kWh	20 years
5MW+	0.030€/kWh	5MW+	0.024€/kWh	20 years

Standard feed-in tariff

Rooftop/BIPV		Ground-mounted		Term
Size	Incentive	Size	Incentive	
1-3kW	0.182€/kWh	1-3kW	0.176€/kWh	20 years
3-20kW	0.171€/kWh	3-20kW	0.165€/kWh	20 years
20-200kW	0.157€/kWh	20-200kW	0.151€/kWh	20 years
200kW-1MW	0.130€/kWh	200kW-1MW	0.124€/kWh	20 years
1MW-5MW	0.118€/kWh	1MW-5MW	0.113€/kWh	20 years
5MW+	0.112€/kWh	5MW+	0.106€/kWh	20 years

Figura 44. Retribuciones especiales a la energía solar FV en Italia. Fuente datos: <https://bit.ly/2HnUDZa>. (Elaboración propia).

¹Esto significa que una instalación FV realizada en 2008 que debía tener una prima por kWh generado determinada, se vió afectada por el cambio regulatorio recibiendo posteriormente una retribución inferior, con el consiguiente efecto sobre su amortización y rentabilidad.

1.10.2. Funcionamiento del Mercado Eléctrico en España

La regulación de los mercados eléctricos en Europa establece la forma en que se comercializa la electricidad, afectando de alguna manera al desarrollo de las EERR y al precio final de la electricidad. De hecho, el sector energético en Europa está experimentando turbulencias, con los precios de la electricidad alcanzando nuevos récords en 2021 y comienzos de 2022. En este contexto, es muy importante entender cómo se establece el precio de la electricidad y cómo funciona el mercado.

¿Cómo funciona el mercado eléctrico en España? El mercado está gestionado por OMIE (Operador del Mercado de Electricidad). El 80 % de la electricidad la generan estas 5 grandes empresas: Endesa, Iberdrola, Unión Fenosa, EdP y Viesgo. **Red Eléctrica Española (REE)** es la corporación que explota el sistema nacional de transporte de energía de la red eléctrica en España. La distribución y comercialización se realiza (90 %) por filiales de las 5 empresas mencionadas anteriormente.

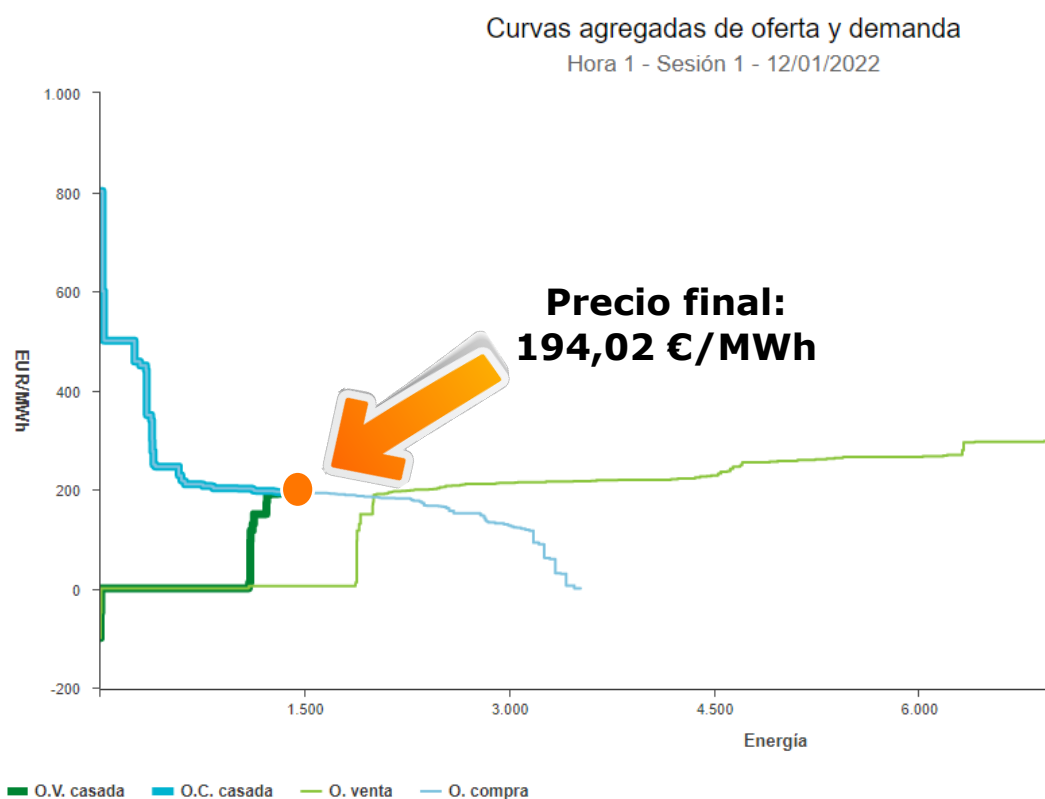


Figura 45. Ejemplo de subasta de electricidad (12 de enero de 2022). Curvas de oferta y demanda (órdenes de compra y venta en marrón y azul, respectivamente). Fuente: OMIE <http://omie.es>

OMIE opera la subasta diaria para establecer los precios de la electricidad para las próximas 24 horas: **¿cómo funciona esta subasta?**

La oferta (curva verde oscuro) es generada por los productores, que pedirán un precio determinado asociado a la oferta. La máxima prioridad en esta licitación se asigna a las **plantas nucleares**, dado que el ajuste de la producción en estas plantas sería por

lo general muy costoso. A las **EERR** se les asigna la segunda prioridad más alta, en un intento de estimular su desarrollo y debido a la imposibilidad de gestionar el recurso asociado (viento, radiación solar, etc.). **A las energías nuclear y renovables se les asigna un precio dado de 0**, como se puede apreciar en [Figura 45](#). Después de las nucleares y las renovables, el resto de plantas/tecnologías se sumarán a la oferta en función del premio ofrecido: de menor a mayor.

La demanda (curva azul) la generan las comercializadoras eléctricas, las empresas que compran la energía para venderla a sus clientes. Muchas empresas decidirán pagar el precio máximo porque ya tienen contratos que deben cumplir para proporcionar electricidad a los clientes. Otros actores de la oferta, por ejemplo las grandes industrias, pueden decidir adaptar su producción en diferentes momentos para abaratar su factura eléctrica.

El precio se establece considerando el punto de encuentro de ambas curvas (oferta y demanda). La última fuente de energía que cubre la demanda establece el **precio de coste marginal**. En el ejemplo de [Figura 45](#), a todas las empresas se les pagará **194,02 euros/MWh**: si la demanda es baja y la producción a través de tecnologías nucleares y renovables es alta, el precio final de la oferta podría ser 0.

Este sistema (fijación de precios de coste marginal de los mercados de electricidad) es de uso común en Europa y está recomendado por la UE; sin embargo, el importante aumento de los precios de la electricidad que hemos experimentado en los últimos meses ha generado controversia sobre la idoneidad de este sistema.

Cuestión 1.13: El mercado eléctrico: sistema marginalista [600 XP]

Los precios de la electricidad han estado subiendo en toda Europa en los últimos meses. Intenta averiguar las razones que explican esta situación y explícalas **con tus propias palabras**. Propón o busca información sobre posibles soluciones que supongan la sustitución del actual sistema de precios marginalista.

1.11. EERR: Almacenamiento de Energía en la Red Eléctrica

Ya sabemos que en España existen centrales de generación eléctrica de diferentes tecnologías: nuclear, hidráulica, ciclo combinado, eólicas, etc. Red Eléctrica de España (REE)¹ se encarga de la operación del sistema eléctrico español, esto es, trata de garantizar en todo momento la seguridad y la continuidad del suministro eléctrico en toda la península, así como en Canarias, Baleares, Ceuta y Melilla.

Para ello es necesario que exista un equilibrio entre la generación y la demanda en tiempo real, dado que no existen aún tecnologías que permitan el almacenamiento de grandes cantidades de energía en la red eléctrica. REE realiza por lo tanto una previsión de la demanda y una posterior monitorización en tiempo real de la generación y transporte para asegurar

¹Web de REE: <https://bit.ly/2ISVSNf>

que en cada momento existe dicho equilibrio. En caso de desviaciones, REE manda órdenes en tiempo real a los distintos centros (por ejemplo a los parques eólicos) para que se pueda ajustar la generación.

Importante 1.26: Demanda y Producción en tiempo real

La web de REE permite el seguimiento en tiempo real de la demanda y producción en tiempo real, con información muy interesante sobre la estructura de generación, CO2 asociado, etc.^a

^a<http://https://bit.ly/1qul8Lx>

En la [Figura 46](#) podemos ver por ejemplo las curvas de demanda y generación, así como al estructura de generación para el 25 de enero del 2021. En la [Figura 47](#), donde se presenta el detalle de la evolución de la estructura de generación, puede apreciarse a simple vista como la eólica, nuclear e hidráulica presentan una contribución significativa. También se aprecia claramente como la solar FV sólo es capaz de generar durante unas horas al día.

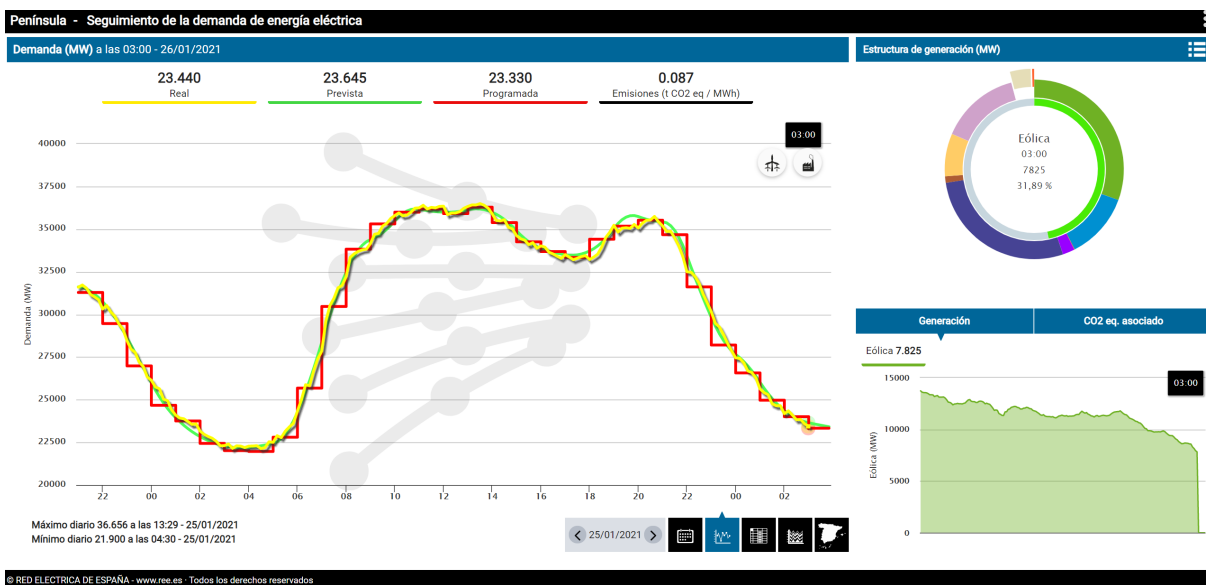


Figura 46. Ejemplo de información en tiempo real sobre demanda y generación en el sistema eléctrica español: 25 Enero, 2021). Fuente: REE. <http://bit.ly/2Mns9D2>

El hecho de que no existan a día de hoy tecnologías maduras para la acumulación de energía a gran escala en la red eléctrica supone de hecho un **gran inconveniente para las EERR**.

Pensemos en las EERR fluctuantes: en la energía eólica por ejemplo. En vez de tener que regular su generación en días de mucho viento, lo ideal sería poder acumular la energía generada excedente de tal manera que pudiese ser utilizada *a posteriori*. La intermitencia de estas EERR es uno de sus principales inconvenientes, tanto por la necesidad de disponer de otras fuentes de generación no fluctuantes (no podríamos depender a día de hoy de un sistema basado sólo en eólica y solar, por ejemplo), como por la necesidad de adecuar la red de transporte a los posibles picos de generación producidos en momentos puntuales.

Relacionado con este tema surge el concepto de **Garantía de Capacidad**: este concepto

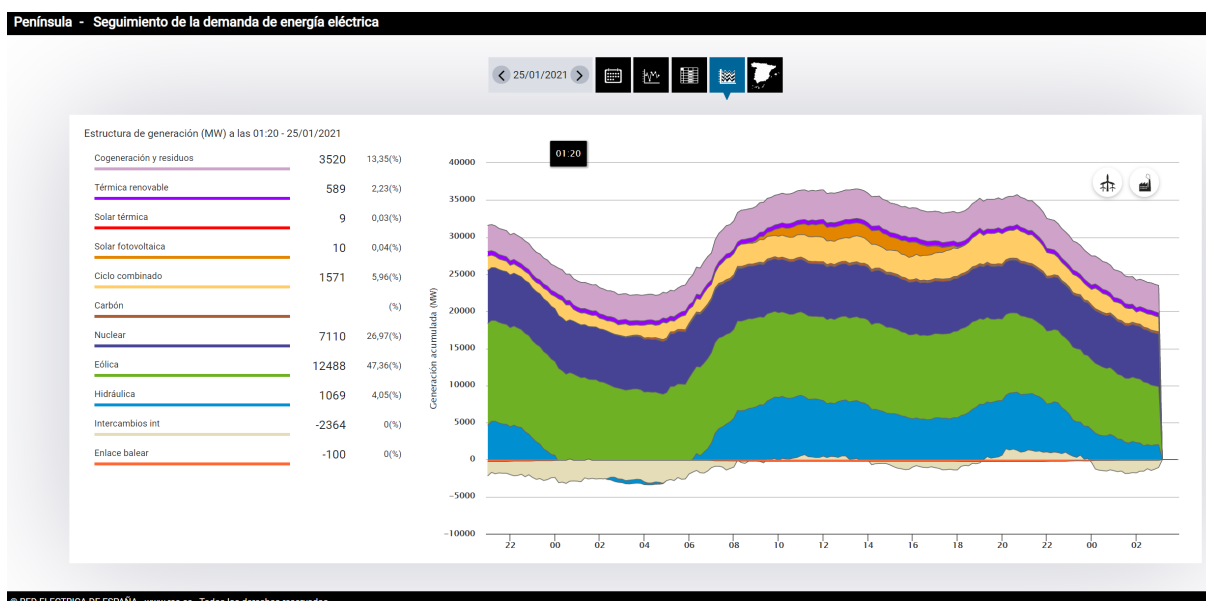


Figura 47. Detalle de la estructura de generación en tiempo real del sistema eléctrica español: 25 Enero, 2021. Fuente: REE. <http://bit.ly/2Mns9D2>

se podría definir como la disponibilidad de una determinada tecnología de proporcionar la potencia instalada en un determinado momento (Figura 48). Evidentemente las energías en las que el recurso puede presentar importantes fluctuaciones, como la eólica y la fotovoltaica, presentan una garantía de capacidad muy baja, lo que supone un problema desde el punto de vista de la generación eléctrica al no disponer de sistemas de almacenamiento.

En los últimos años, el interés e investigación en tecnologías de almacenamiento ha aumentado significativamente, existiendo diferentes soluciones tecnológicas prometedoras. Hay que destacar de hecho que la hidráulica de bombeo o reversible¹ es a día de hoy la única tecnología madura que permite el almacenamiento de energía eléctrica en la red.

En el documento del IDAE *Evolución tecnológica y prospectiva de costes de las EERR*² se presenta un estudio muy interesante sobre las tecnologías de almacenamiento, estableciendo las siguientes categorías: mecánicas, térmicas, electromagnéticas y electroquímicas (ver Figura 49).

En este estudio del IDAE se presenta también una comparativa muy interesante entre las diferentes tecnologías (ver Figura 50), atendiendo a su madurez tecnológica, el coste de la energía, posibles limitaciones en los emplazamientos (pensemos en el caso de la hidráulica de bombeo, por ejemplo), la posible oposición pública prevista y el apoyo político.

Veamos algunos de los comentarios recogidos en el estudio del IDAE en relación a algunas de estas tecnologías de almacenamiento:

Hidráulica de bombeo La hidráulica de bombeo es el almacenamiento con mayor base instalada global. Su funcionamiento es muy simple, ya que se basa en la utilización de bombas para transportar agua desde el nivel base hasta un depósito elevado. La energía

¹Lo veremos en detalle en el capítulo dedicado a "otras EERR".

²<https://bit.ly/2nRALmR>

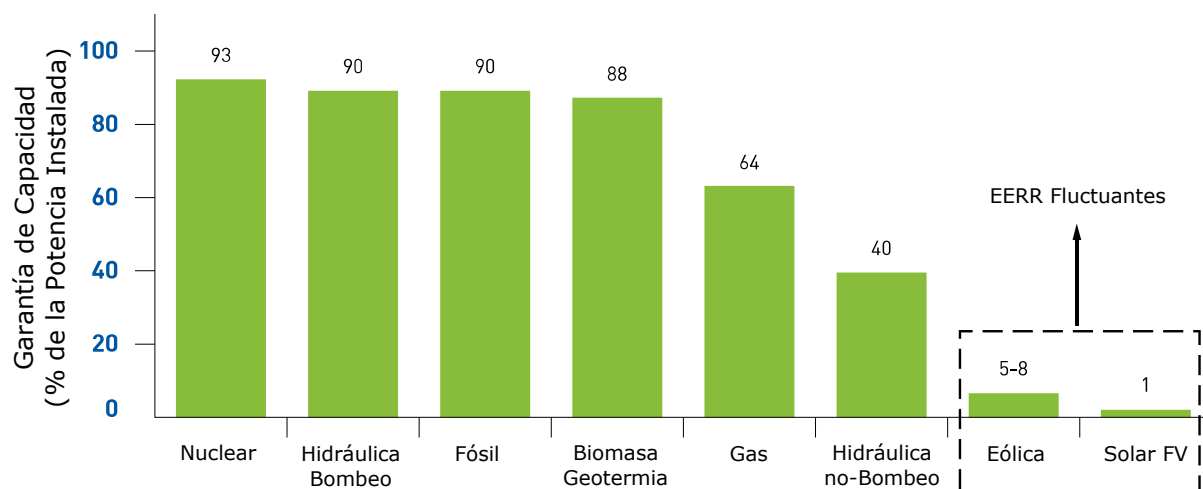


Figura 48. Garantía de capacidad asociada a diferentes tecnologías de generación eléctrica. Fuente: IDAE (*Evolución tecnológica y prospectiva de costes de las EERR*). <http://bit.ly/2nRALmR>

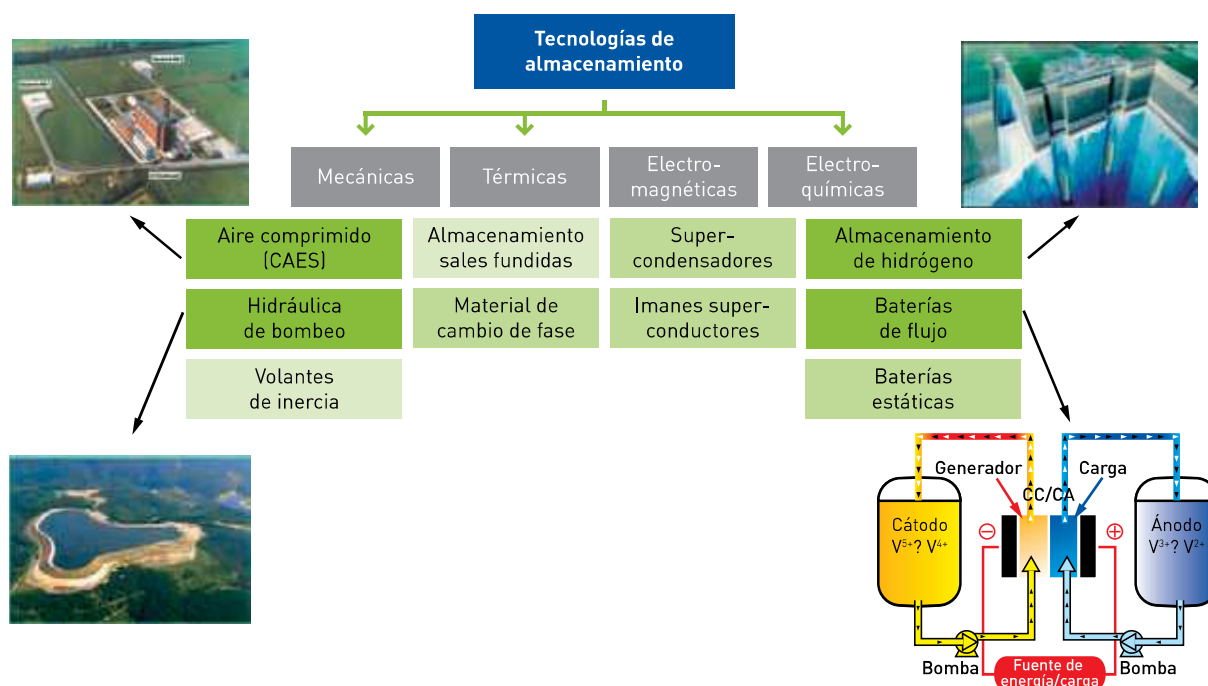


Figura 49. Tecnologías de almacenamiento de energía en la red eléctrica. Fuente: IDAE (*Evolución tecnológica y prospectiva de costes de las EERR*). <https://bit.ly/2nRALmR>

almacenada como energía potencial de agua se conserva en un depósito elevado, que se recupera dejando que el torrente de agua vuelva al nivel de base a través de generadores de turbina.

Las ventajas de esta tecnología son su escalabilidad total y su alta eficiencia de ciclo del aproximadamente 80 %. Sin embargo, su potencial se encuentra limitado por las barreras de expansión de la capacidad energética debido a la disponibilidad limitada de emplazamientos adecuados en muchos países.

La valoración general es que se trata de una tecnología madura y fiable pero con

	Madurez tecnológica	Coste de la energía	Limitaciones del emplazamiento	Oposición pública	Apoyo político
(A)-CAES	Parcialmente madura	Superior en la mayoría de las aplicaciones	La mayoría de países desarrollados pueden construir cisternas de almacenamiento subterráneo	Se espera que la oposición sea leve	La mayoría de países desarrollados están financiando proyectos de I+D en todas las tecnologías
Hidrógeno	Debe demostrarse a gran escala	Superior sólo a gran escala y largo plazo		Posibles objeciones sobre seguridad, pero los proyectos de referencia son seguros	EE.UU.: proyecto de ley presentado al Congreso que define un 20% de créditos fiscales a la inversión para instalaciones de almacenamiento
Baterías de flujo	Debe demostrarse a gran escala	Superior sólo a pequeña escala y corto plazo	Sin requisitos geológicos concretos	Pocas objeciones medioambientales, excepto el vertido de productos químicos	UE: Alemania eliminó la tarifa por uso de la red para las instalaciones de almacenamiento
Hidráulica de bombeo	Madura	Competitiva en costes según la ubicación	Europa dispone de emplazamientos (barreras ambientales entre países)	Pocas objeciones medioambientales, profundo impacto en el paisaje	OM: sin medidas conocidas

■ / ■ = des-/ventaja relativa a la tecnología

Figura 50. Análisis comparativo entre las diferentes tecnologías de almacenamiento de energía en la red eléctrica. Fuente: IDAE (*Evolución tecnológica y prospectiva de costes de las EERR*). <https://bit.ly/2nRALmR>

un alcance real limitado para nuevos proyectos y con dificultad de funcionamiento en emplazamientos cálidos (evaporación).

CAES Las tecnologías CAES y (A)-CAES implican sistemas, en principio, potencialmente aptos para la nivelación de la carga a gran escala. Su funcionamiento se basa en el uso de bombas para el almacenamiento de aire comprimido en tanques o emplazamientos. Es decir, la energía se almacena como energía mecánica en forma de aire presurizado, en el caso del CAES, o de calor en la (A)-CAES, que posteriormente se descarga sobre turbinas para generar electricidad. Las ventajas de esta tecnología son la escalabilidad total de la capacidad energética y su potencial como solución económica para el almacenamiento a corto plazo. Sin embargo, su eficiencia en el ciclo, esto es, la diferencia entre la energía almacenada y producida es baja (40-55 % CAES vs 60-70 % (A)-CAES) lo que conlleva que los principales retos tecnológicos futuros se centren en la mejora de la compresión de calor y el almacenamiento de calor presurizado.

La valoración general es que se trata de una tecnología comercial con I+D en curso, preferida para la nivelación de carga a gran escala con bajos niveles de eficiencia.

Almacenamiento de Hidrógeno Los emplazamientos de hidrógeno son una buena solución para el almacenamiento a largo plazo. Su funcionamiento se basa en la electrolisis para la generación del H₂ (y O₂) y el posterior almacenamiento del H₂, bien en emplazamientos o tanques, lo que permite una posterior generación eléctrica (y calorífica) en turbinas o celdas de combustible.

Las ventajas de esta tecnología son la mayor densidad energética entre las grandes soluciones de escala (unas 65 veces mayor que el A-CAES) y que supone la solución

más económica para el almacenamiento a largo plazo de energía. Sin embargo, es una tecnología que en la actualidad mantiene bajas eficiencias ($< 40\%$) y que demanda la construcción de grandes emplazamientos.

La valoración general es la de una tecnología que podría suponer una solución potencial para la potencia de la carga base a partir de parques eólicos a gran escala, pero que todavía está en una etapa conceptual, en las que sólo se han probado soluciones parciales.

Sales fundidas El almacenamiento térmico para CSP (*Concetrated Solar Power* o Energía Solar Térmica/Termoeléctrica) a través de las sales fundidas. Esta tecnología se basa en la utilización de la energía solar concentrada para calentar sales fundidas de forma indirecta (a través de petróleo sintético en CSP de cilindro parabólico) o directamente (en las configuraciones de torre de potencia). Para la descarga, el calor almacenado se transfiere a electricidad a través de una turbina de vapor. El sistema de dos tanques es la solución moderna más típica por la cual las sales fundidas son bombeadas del tanque “frío” al intercambiador de calor y después hasta el tanque caliente.

La principal ventaja de esta tecnología es que no hay conversión a energía eléctrica antes del almacenamiento, lo que favorece la eficiencia del ciclo. Sin embargo, se trata de una opción no apta para las soluciones descentralizadas, ya que la sal puede congelarse durante los periodos de baja radiación.

Por tanto, nos encontramos frente a una tecnología madura con I+D en curso que se limita principalmente a las plantas de energía solar de concentración, con un potencial uso en otras tecnologías que todavía está siendo evaluado (en particular, se está estudiando para el contexto de las tecnologías de CAES).

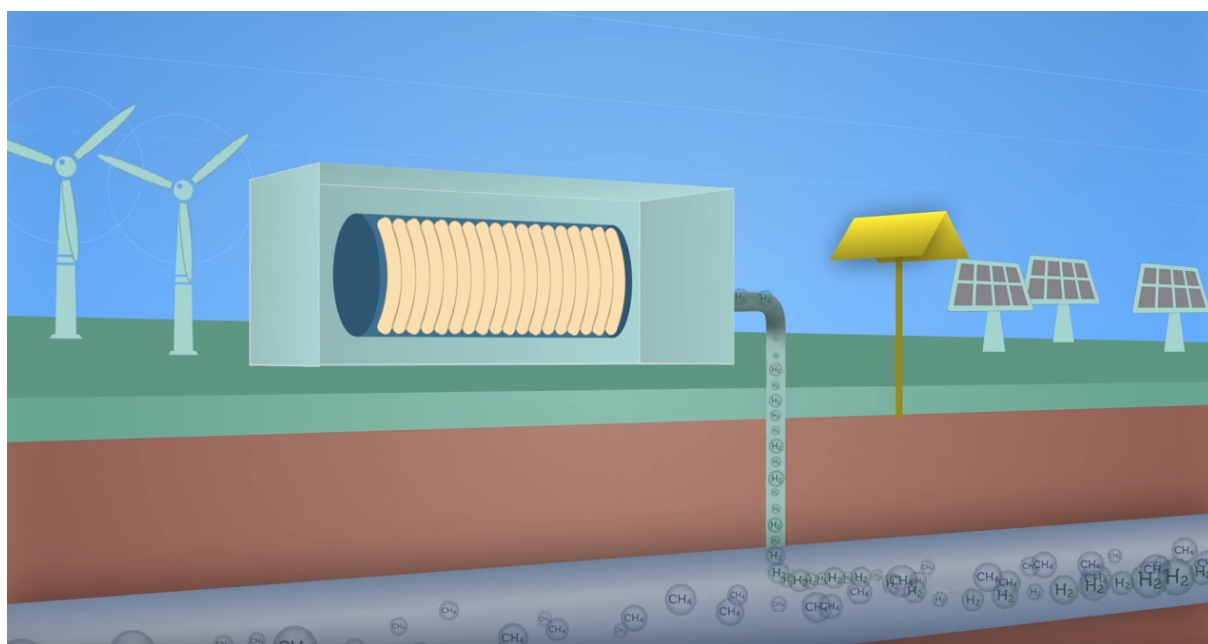


Figura 51. Imagen ilustrativa de la tecnología de almacenamiento “Power to Gas”. Fuente: YouTube. Licencia: YouTube standard. <https://youtu.be/j6ktfz2R9fo>

Importante 1.27: Power To Gas

El concepto de “Power to Gas” está tomando vigencia en los últimos años en relación a las nuevas tecnologías de almacenamiento de energía a gran escala en la red eléctrica. Como se explica en el siguiente vídeo, esta tecnología se basa en utilizar energía eléctrica para generar gas, por ejemplo hidrógeno mediante electrólisis partiendo de agua. De este modo, el gas generado es fácilmente acumulable y transportable por las canalizaciones de gas convencionales. Además, este gas puede utilizarse para generar energía fácilmente, incluso podría combinarse con CO₂ para dar lugar a otros compuestos, como metano sintético.

Si quieres saber más sobre Power to Gas, consulta el siguiente vídeo (3 minutos):

<https://youtu.be/j6ktfz2R9fo>.

Para finalizar esta parte mencionaremos el proyecto “Almacena” de REE, con el que se pretende conseguir una **capacidad de almacenamiento de 1MW** mediante la utilización de baterías de celdas prismáticas de Ión-Litio¹.

Cuestión 1.14: Tecnologías de Almacenamiento (600 XP)

Por limitaciones del temario no podemos explicar detenidamente las diferentes tecnologías. Busca información sobre alguna de las tecnologías no comentadas y explica brevemente su principio de funcionamiento.

Alternativamente, busca más información sobre alguna de las 4 tecnologías descritas, indicando por ejemplo proyectos reales de aplicación o seleccionando algún artículo científico que consideres interesante y explicando brevemente su contenido^{ab}.

^aTen en cuenta que las búsquedas de artículos científicos siempre es recomendable realizarla en inglés, al encontrarse la mayor parte de las publicaciones en dicho idioma.

^bPara buscar artículos científicos puedes recurrir a bases de datos científicas como *Google Scholar* <https://scholar.google.es/> o *Engineering Village* <http://www.engineeringvillage.com/>, por ejemplo.

Importante 1.28: Tesla: la Mayor Batería del Mundo

Tesla ha instalado en tan sólo unos meses y comenzado a operar recientemente una **batería de 100 MW/129 MWh** en Australia. El proyecto, con un coste estimado de unos 50 M\$, parece que será muy rentable, dado que parece capaz de ganar cantidades en el entorno del 1 M\$ en tan sólo unos pocos días. Cuando la generación de energía supera a la demanda, los consumidores son remunerados por “tomar” energía de la red eléctrica. Esta instalación es capaz de hacer esto a gran escala, con un beneficio de unos 790 \$ por MWh absorbido. La batería es también, por supuesto, capaz de suministrar la energía almacenada cuando la demanda lo requiera. El **Proyecto PowerPack** constituye la **mayor batería de ion-Litio (Li-ion)** a fecha de hoy.

Después de haber analizado la situación actual de las EERR, llega el momento de descubrir que **las telecomunicaciones presentan diversos vínculos con las EERR**. Esto hace aconsejable que los profesionales que van a trabajar en dicho sector tengan una serie de

¹<https://bit.ly/2BKOSSz>



Figura 52. Proyecto PowerPack de Tesla en Hornsdale (Australia). Fuente: electrek <http://bit.ly/2DJsw0W>



Figura 53. Elon Musk en la presentación del Powerpack Project. Fuente: YouTube (Standard License) <http://bit.ly/2GsLbQP>

conocimientos básicos que les puedan permitir el diseño de sencillas instalaciones renovables o incluso de emplear sus conocimientos en sistemas de comunicaciones o sensores en este entorno.

1.12. Telecomunicaciones y EERR

Este apartado va a estar dedicado a explorar los diferentes nexos de unión que pueden establecerse entre las **EERR** y las **telecomunicaciones**: desde las más obvias como la alimentación de infraestructuras de telecomunicación, a las más “sofisticadas”, como el desarrollo de **sistemas sensores**.

1.12.1. Alimentación de sistemas de telecomunicaciones

Si tratásemos de pensar sobre estas posibles relaciones, probablemente la primera que nos vendría a la mente sería el uso de pequeñas instalaciones solares fotovoltaicas o incluso mini o micro-eólicas para la alimentación de sistemas de telecomunicación. Un ejemplo típico sería la alimentación de una EBT (estación base de telefonía móvil) (BTS: *Base Transceiver Station*), considerando bien la alimentación de todo el sistema o bien sólo de alguna parte específica, como un posible sistema de refrigeración¹.



Figura 54. Ejemplo de instalación fotovoltaica y eólica vinculada a una estación TDT en Uceda (Guadalajara, España). <https://bit.ly/2AZwlyA>

Aunque de manera natural pensamos en este tipo de instalaciones, situadas en emplazamientos donde en ocasiones el acceso al tendido eléctrico puede ser complicado, y vinculadas a la telefonía móvil, TDT, internet, etc.; existen otros ejemplos vinculados al ámbito de las telecomunicaciones pero en un contexto totalmente distinto, ilustrado por la [Figura 55](#).

¿Qué vemos en la imagen? Se trata de un **sistema de aforo automático**, basado en sensores magnéticos y empleados para la medida del tráfico en puntos específicos para el posterior dimensionamiento de carreteras, rotondas, etc. Por su emplazamiento en la carretera, la alimentación de estos dispositivos mediante cables no sería conveniente, motivo por el que se exploró la posibilidad de un **sistema de alimentación basado en un laminado fotovoltaico de capa fina**¹, que se aprecia en la imagen.

¹Podéis consultar el proceso de diseño y dimensionamiento de una instalación FV para alimentar a una BTS en el siguiente Proyecto Fin de Carrera: *Diseño de una instalación fotovoltaica para una estación base en Teruel, España* <https://bit.ly/2oMNJo6>

¹Las diferentes tecnologías de células fotovoltaicas se estudiarán más adelante en este curso

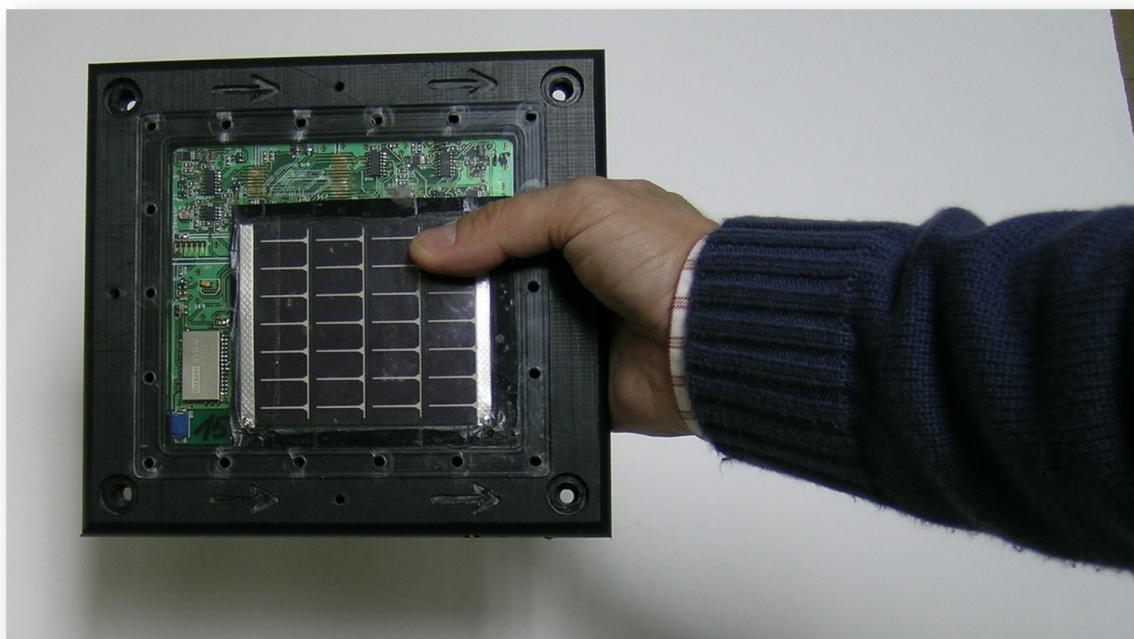


Figura 55. Sistema de aforo automático desarrollado por el Grupo de Ingeniería Fotónica de la Universidad de Cantabria.

1.12.2. I+D

El profesional de las telecomunicaciones también puede tener mucho que aportar en el campo de la investigación y desarrollo en el ámbito renovable, por ejemplo en la mejora de la eficiencia de las células/paneles fotovoltaicos. El laminado fotovoltaico, donde se produce la conversión de los fotones incidentes a los electrones que formarán la corriente eléctrica deseada, no es sino una unión P-N, tradicionalmente formada por Silicio pero que, con el avance tecnológico, ha ido involucrando nuevos materiales. En este campo, así como en el de la óptica implicada, se están realizando grandes esfuerzos por superar las limitaciones existentes, que sitúan la eficiencia máxima de sistemas comerciales por debajo del 16-18 % a día de hoy.

Además, muchos sistemas solares térmicos/termoeléctricos o de concentración (CSP: *Concentration Solar Power*) requieren de sistemas de seguimiento (solar tracking) sofisticados, en muchos casos ayudados por sensores que monitorizan variables como la irradiancia del Sol.

Pero el ámbito de las telecomunicaciones no se limita sólo al mundo solar: los grandes parques eólicos requieren de una monitorización constante y en tiempo real de la producción y del estado de los aerogeneradores. Para ello se suelen emplear multitud de sensores y sistemas de comunicaciones basados en redes de fibra o, incluso, en comunicaciones inalámbricas¹.

¹Ejemplo de artículo científico en el que se trata este tema: "Wireless Monitoring of Urban Wind Turbines by ZigBee Protocol: Support Application Software and Sensor Modules " <https://bit.ly/2D5j88C>

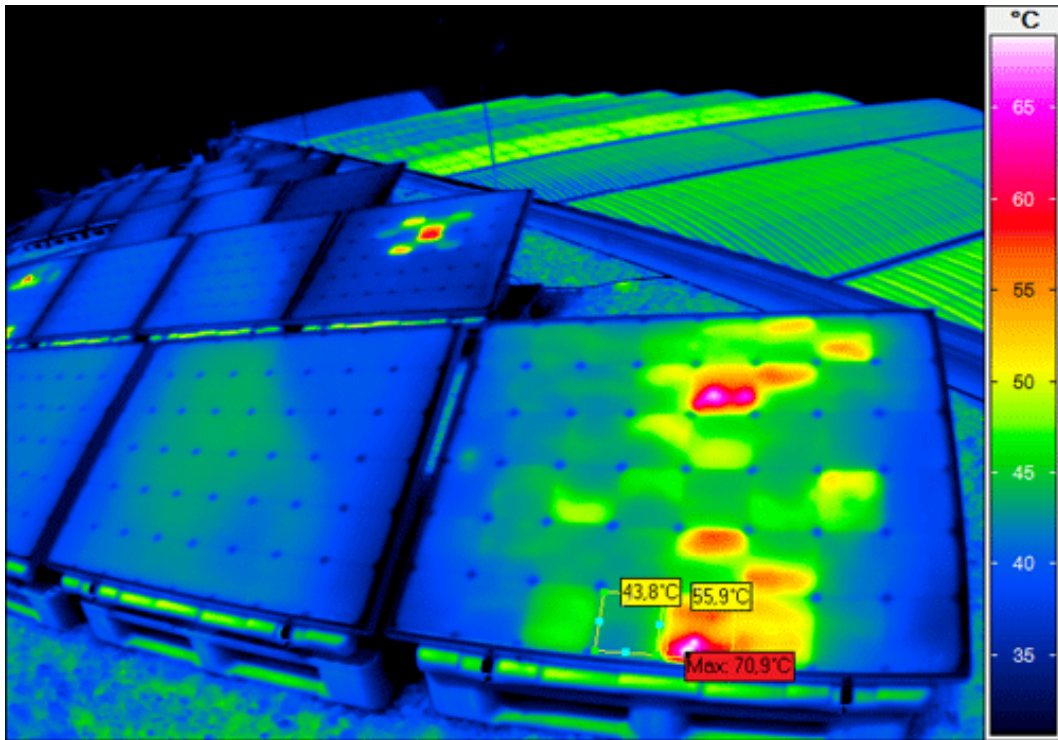


Figura 56. Ejemplo de inspección termográfica de una instalación FV. Fuente: Infratec <https://bit.ly/2CDJIok>

1.12.3. Sensórica aplicada a infraestructuras renovables

Cuando hablamos de “sensórica” o de sistemas sensores, estamos hablando de sistemas derivados del ámbito de las telecomunicaciones que pueden servir para monitorizar, idealmente en tiempo real, instalaciones, sistemas o estructuras asociadas con las energías renovables.

Monitorización de instalaciones fotovoltaicas

Un ejemplo típico de aplicación lo tenemos en la **inspección de instalaciones FV** mediante el uso de la **termografía infrarroja**. Esta tecnología se basa en el uso de cámaras con sensores que permiten capturar la radiación en el infrarrojo (IR). Como sabemos, esta radiación está asociada al calor o, mejor expresado, cualquier cuerpo caliente emite radiación infrarroja (como ocurre con la Tierra y el efecto invernadero) cuyas características dependerán de su temperatura y su emisividad.

Como veremos en la sección dedicada a la energía solar FV, los puntos calientes o hot-spots suponen un serio problema para los módulos FV, siendo necesaria su inspección periódica (p.ej. 2 veces al año). En la [Figura 56](#) podemos ver la inspección termográfica de una instalación FV en un tejado. Puede apreciarse como la temperatura de algunas células es más elevada, indicando que, en vez de generar energía, están actuando como resistencias disipando energía en forma de calor.



Figura 57. Imagen del ensayo de un aerogenerador en el que un fallo tiene consecuencias fatales. Fuente: YouTube <https://youtu.be/CqEccgR0q-o>. Licencia YouTube estándar.

Monitorización de instalaciones eólicas: sensores de fibra óptica

También existen ejemplos muy interesantes de monitorización asociados a otras EERR, como la **energía eólica**. El coste de un aerogenerador², si bien variable, puede situarse de manera aproximada en el entorno **de 1 a 2 millones de euros por MW instalado**. Una pala de un aerogenerador (los europeos suelen ser tripala), dependiendo de las características, materiales y dimensiones, puede tener un coste de unos 200.000 euros.

Evidentemente, asegurar la integridad estructural de este tipo de elementos es fundamental, tanto para evitar un mal funcionamiento como para poder detectarlo con la suficiente antelación como para poder reaccionar y **evitar situaciones catastróficas** como la que se puede apreciar en el siguiente vídeo: <https://youtu.be/CqEccgR0q-o>.

En el vídeo puede apreciarse como, aunque finalmente toda la estructura, incluida la torre, acaba destruida, el primer elemento que se rompe y genera el posterior desenlace es una de las palas, probablemente porque se ha sometido al rotor a un viento demasiado intenso y los mecanismos de regulación o frenado de emergencia no han funcionado correctamente. En este sentido podemos preguntarnos: ¿de qué material está construida la pala de un aerogenerador? Frente a lo que pudiera pensarse en un primer momento, las palas no son metálicas, sino que están fabricadas con lo que se denomina *materiales compuestos*, como la fibra de carbono. Estos materiales hacen que la pala sea “flexible” y que haya que realizar test en instalaciones especializadas para verificar su correcto diseño y funcionamiento. En el siguiente vídeo se pueden observar algunos de los test a los que se somete a una de las palas más largas del mundo (88.4 metros, con un área de barrido del rotor superior a 3 campos de fútbol), donde

²El ejemplo se refiere a un aerogenerador de gran tamaño, como los empleados típicamente en los campos eólicos



Figura 58. Imagen del ensayo estructural de una pala de aerogenerador de 88.4 metros de longitud. Fuente: LM Wind Power. Fotograma del vídeo YouTube: <https://youtu.be/5m-jwwM3qRs>

se observan claramente las grandes deformaciones que puede llegar a sufrir la estructura: <https://youtu.be/5m-jwwM3qRs>.

Durante los ensayos se emplean típicamente sensores eléctricos que permiten medir la deformación sufrida por la pala. Sin embargo, existe **tecnología basada en fibra óptica** que permite medir en tiempo real, e incluso de manera distribuida (no en un único punto, sino a lo largo de toda la fibra) la respuesta de la pala en cada momento. Estamos ante un ejemplo de monitorización de una infraestructura renovable mediante un sistema sensor directamente relacionado con las telecomunicaciones. De hecho, el sistema sensor de fibra puede conectarse con la red de fibra de comunicaciones del parque eólico.

Veamos un par de ejemplos de este tipo de sensores:

1.12.4. Sensores de Fibra Óptica: FBGs (Fiber Bragg Gratings)

Los FBGs (Fiber Bragg Gratings) o redes de difracción son sensores puntuales¹ que son capaces de dar información acerca de la **temperatura** y de la **tensión mecánica (strain)** a los que se encuentra la fibra óptica en ese punto.

Desde el punto de vista físico, un FBG es una variación periódica del índice de refracción del núcleo de la fibra óptica, tal y como se muestra en la [Figura 59](#). Aunque existen diferentes tipos, el funcionamiento de los FBGs convencionales se basa en que ese elemento, “grabado” en el interior de la fibra óptica², refleja una longitud de onda específica de la luz incidente (ver

¹“Puntual” implica que dan la medida sobre un punto concreto, el punto de la fibra en el que se encuentra el sensor.

²Existen diferentes métodos de fabricación de FBGs, por ejemplo mediante el uso de máscaras de fase y láseres UV.

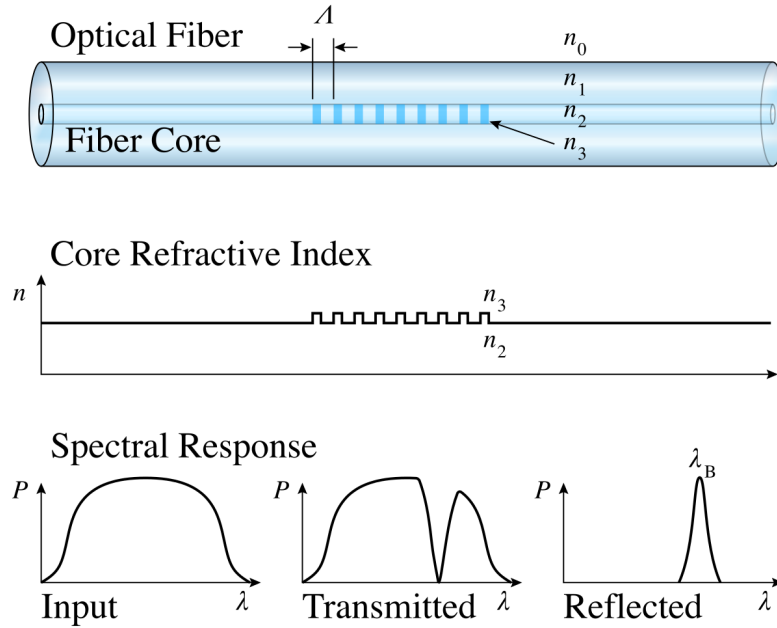


Figura 59. Esquema del funcionamiento de un FBG. Fuente: Wikimedia Commons. Licencia: CC BY-SA 3.0. <http://bit.ly/2JDIjGJ>

parte inferior de la Figura 59). Esta longitud de onda viene dada por la siguiente ecuación:

$$\lambda_B = 2 \cdot n_e \cdot \Lambda \quad (1.1)$$

En la ecuación anterior λ_B es la **longitud de onda de Bragg** (la que refleja la red de difracción), n_e el **índice de refracción efectivo** del FBG y Λ el **periodo de la red de difracción** (la separación entre las “franjas” grabadas en el núcleo de la fibra). Como la respuesta espectral del FBG es muy estrecha (podemos estar hablando de 0.5 o 1 nm), una aplicación típica de estos dispositivos es el filtrado de señales ópticas. Por otro lado, la longitud de onda de Bragg depende de la temperatura y strain a los que esté sometida la fibra en ese punto, por lo que también pueden ser utilizados como sensores de ambos parámetros.

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = C_S \cdot \epsilon + C_T \cdot \Delta T \quad (1.2)$$

En la ecuación anterior vemos que tanto la aplicación de un *strain* (tensión mecánica/elongación) a la fibra como una variación en la temperatura provocarán un desplazamiento en la longitud de onda de Bragg. Por tanto, una vez que esté convenientemente calibrado, un FBG puede actuar perfectamente como sensor. Aunque se pueden multiplexar múltiples FBGs en una misma fibra óptica utilizando longitudes de onda ligeramente distintas para cada uno, conviene tener claro que estamos hablando de un **sensor puntual**, esto es, de sensores que dan la medida para un punto específico en el que se encuentran localizados en la fibra óptica.

Dentro de las múltiples aplicaciones de los FBGs, muchas están relacionadas con las energías renovables: desde centrales CSP a geotérmicas, pasando por los parques eólicos, donde puede interesar monitorizar desde el comportamiento estructural de la torre del aerogenerador hasta las palas del rotor. En este sentido la [Figura 60](#) muestra la instalación de sensores de fibra óptica (en concreto FBGs) en la pala de un aerogenerador para su posterior ensayo y validación.

Importante 1.29: FBGs: Aplicaciones (¡BONUS! 800 XP)

Los FBGs son una tecnología madura a día de hoy, con multitud de aplicaciones en diferentes campos. Haz un búsqueda en una base de datos específica (por ejemplo Google Scholar: <https://scholar.google.es/>), selecciona un artículo de investigación al respecto y explica brevemente, con tus propias palabras, la aplicación en la que se utilizan estos sensores de fibra óptica.

1.12.5. Sensores Distribuidos de Fibra Óptica: *scattering* de Brillouin y Raman

Los **sensores de fibra óptica también pueden ser distribuidos**, esto es, permitir la medida distribuida a lo largo de la fibra óptica. Esto representa grandes ventajas ya que se pueden llegar a **grandes distancias de medida (entre 100 y 200 km, por ejemplo) con resoluciones espaciales del orden de 1 metro**. Desde el punto de vista práctico esto implica que se pueden monitorizar estructurales tales como oleoductos o líneas de transporte eléctrico, con información en tiempo real de lo que está ocurriendo, que de otra manera (con otras tecnologías) sería muy difícil de obtener.

Los **sensores distribuidos de fibra óptica se basan en los procesos de *scattering* o dispersión que tienen lugar en la fibra óptica**. Tal y como se ha representado en la [Figura 61](#), cuando se introduce un pulso de luz en la fibra óptica, en cada punto de ésta el pulso interacciona con pequeñas “imperfecciones” o partículas, provocando que una parte muy pequeña de la luz del pulso sea “dispersada” en dirección contraria a la de propagación. El ejemplo más conocido de los fenómenos de *scattering* es probablemente el ***scattering* de Rayleigh¹**, responsable del color azul del cielo en la Tierra.

Algunos fenómenos de dispersión, como los denominados **Brillouin y Raman**, son capaces de aportar información muy valiosa sobre el punto donde se produce el fenómeno. En concreto el primero permite medir temperatura y *strain*, mientras que el segundo sólo temperatura. De este modo, con una unidad interrogadora (ver [Figura 62](#)) específica y una fibra óptica estándar, podemos disponer de un sensor que aporte muchísimos puntos de medida (**¡más de 1 millón!**) a lo largo de la fibra.

Un muy buen ejemplo de aplicación de esta tecnología de telecomunicaciones lo podemos encontrar en la monitorización del cable de “vertido” de parques eólicos *offshore*¹. Este término se refiere a conjuntos de aerogeneradores instalados no en emplazamientos terrestres,

¹Para más información sobre el scattering de Rayleigh: <http://bit.ly/2YoP1Uo>.

¹En realidad cualquier instalación renovable instalada en el mar, por ejemplo boyas undimotrices, necesitarán este tipo de cable para llevar la energía generada a donde vaya a ser utilizada.



Figura 60. Imagen de la instalación de un sensor de fibra óptica en la pala de un aerogenerador.
Fuente: Grupo de Ingeniería Fotónica de la Universidad de Cantabria

sino en el mar, típicamente a unos pocos kilómetros de la costa. En estos parques cobra especial importancia el denominado **cable de vertido**, que lleva la energía generada desde los aerogeneradores a la costa. Un problema en este cable implicará que se perderá parte (o toda) la energía generada, pero **¿cómo localizar un problema en un cable de vertido submarino?**

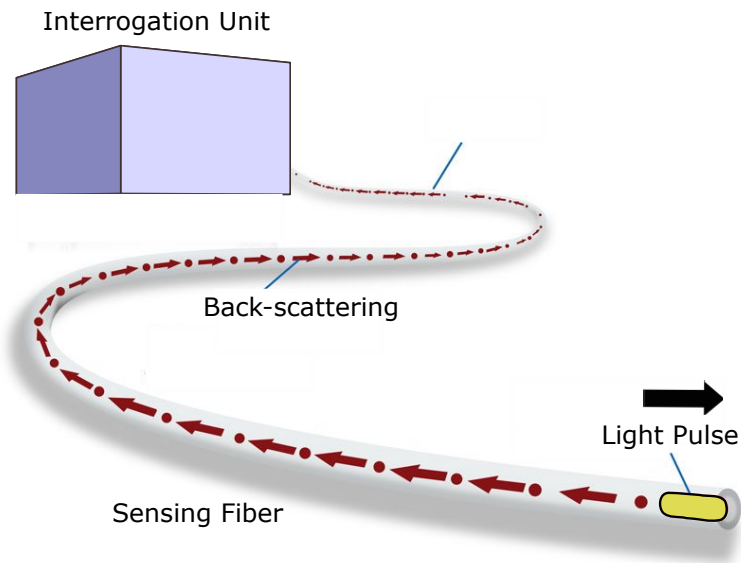


Figura 61. Esquema del principio de funcionamiento de los sensores distribuidos de fibra óptica basados en procesos de scattering. Fuente: YouTube. Licencia: YouTube standard. <https://youtu.be/TQmtv45D50A>.

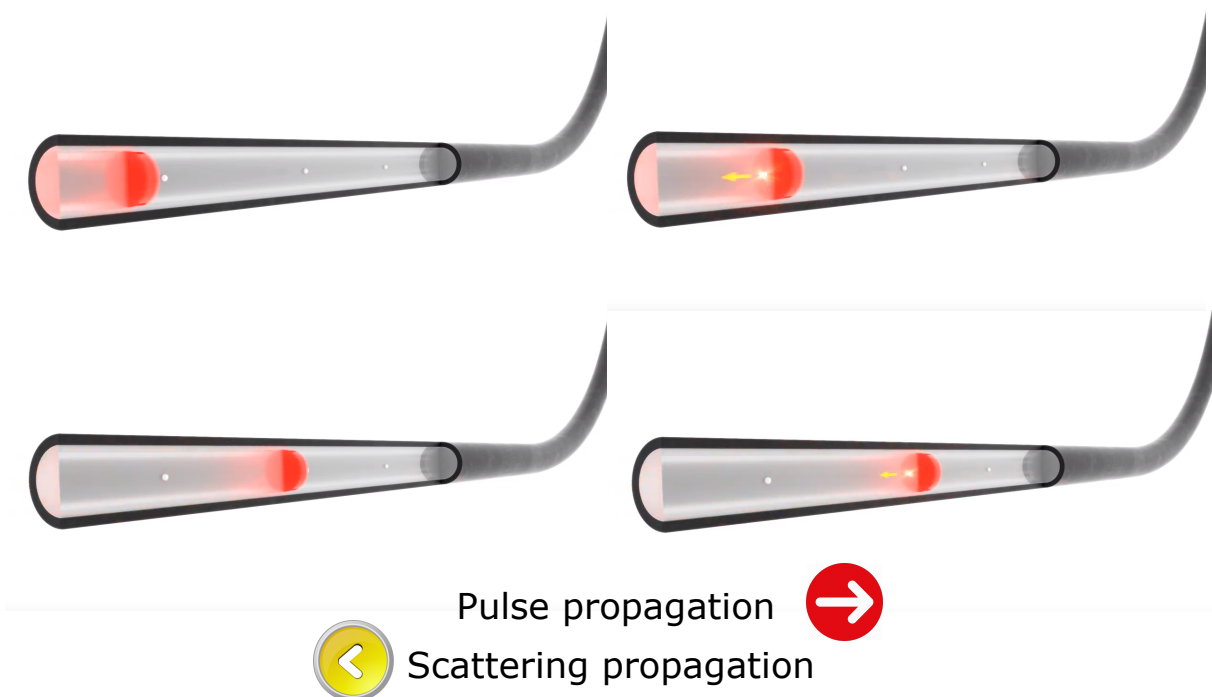


Figura 62. Esquema del principio de funcionamiento de los sensores distribuidos de fibra óptica basados en procesos de scattering (detalle de la unidad interrogadora). Fuente: fibergratings.com. <http://bit.ly/2HHCyWu>.

Dado que estos cables ya incorporan **fibra óptica que transporta las señales para el control y monitorización de cada aerogenerador**, puede usarse dicha fibra (o una específica) para detectar, mediante **scattering de Brillouin**, un posible fallo (que se presentaría típicamente como un aumento de temperatura en el cable) o incluso localizar exactamente

una rotura o problema mecánico.

Importante 1.30: Arduinos, Raspberries ...

La eclosión en los últimos años de soluciones hardware sencillas y de bajo coste como **Raspberry Pi o Arduino** ha hecho que a día de hoy sea barato y relativamente sencillo diseñar e implementar un sistema que pueda monitorizar una instalación FV, por ejemplo.

Puedes ver un ejemplo en el Trabajo Fin de Grado de Óscar López *Sistema de monitorización ambiental basado en hardware open-source alimentado mediante energía fotovoltaica*: <https://bit.ly/2ByCbaW>

Importante 1.31: *Structural Health Monitoring*

El campo de la monitorización de infraestructuras no se limita ni mucho menos al ámbito de las EERR, sino que cobra pleno sentido en el campo de la **ingeniería civil**. Hablamos de obras con un coste muy alto y donde el conocer el estado de la estructura puede incluso ayudar a prevenir posibles catástrofes. Puentes, presas, carreteras, edificios ... el número de ejemplos donde este tipo de tecnología cobra sentido es muy amplio. En el siguiente vídeo se puede apreciar como un puente (construido en España como parte del trazado del AVE) entra en resonancia debido a las características del viento de la zona: <https://youtu.be/QTk7siHbAEk>.

Este es uno de los fenómenos que justifica la necesidad de monitorización de este tipo de estructuras. Como curiosidad, el fenómeno de resonancia en este ámbito es muy conocido por el famoso caso del puente **Takoma Bridge** (<https://youtu.be/3mclp9QmCGs>).

Cuestión 1.15: Scattering Rayleigh

El efecto de dispersión (*scattering*) más común es la **dispersión de Rayleigh**, que de hecho es responsable del color azul del cielo.

Busca información (por ejemplo un vídeo en YouTube) e intenta explicar **con tus propias palabras** cómo la dispersión de Rayleigh afecta la radiación solar entrante haciendo que el cielo se vea azul (y el sol amarillo).

1.12.6. Calibrado dinámico de líneas de alta tensión

Uno de los principales problemas asociados a las EERR, en concreto a su integración al mix eléctrico tradicional, es su carácter **fluctuante**. La energía eólica y la solar fotovoltaica, por mencionar los dos ejemplos más significativos, dependen de sendos recursos (viento y radiación solar directa) que no son constantes, y cuya predicción en muchos casos no es sencilla.

En este contexto, y teniendo en cuenta la imposibilidad de acumular grandes cantidades de energía en la red eléctrica, **el dimensionamiento de la red eléctrica de transporte se presenta como un reto importante**. Los cables conductores de dicha red estaban dimensionados para las centrales de generación convencionales, pero ahora se enfrentan a que,



Figura 63. Imagen de la instalación de sensores meteorológicos en una línea de alta tensión. Fuente: Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética de la Universidad de Cantabria

en momentos puntuales, su requerimiento de capacidad puede aumentar significativamente en momentos puntuales, por ejemplo cuando haya viento.

¿Cómo enfretarnos a este problema? Evidentemente, una solución directa sería la sustitución de las infraestructuras antiguas por otras con una mayor capacidad, pero el coste de estas acciones sería muy significativo. Un enfoque mucho más elegante y eficiente lo aporta la tecnología mediante sistemas de sensores que permitan actuar en tiempo real (en la [Figura 63](#) se aprecia la instalación de sensores meteorológicos en una línea de alta tensión).

La pregunta a plantearse es: ¿es la capacidad de transportar energía de una línea de alta tensión una característica estática? La respuesta es NO. La ampacidad¹ nominal del conductor puede en realidad superarse sin peligro en ciertos momentos, ya que es dependiente de la temperatura, esto es, la ampacidad nominal está calculada para una temperatura determinada.

Pero esta temperatura podrá variar en función de la corriente que circule por los cables, la radiación solar que reciban en un determinado momento, la velocidad del viento (que tendrá un efecto de refrigeración), etc. **Si monitorizamos en tiempo real esos parámetros con un conjunto de sensores y somos capaces de transmitir esa información también en tiempo real, se podrá recalcular la ampacidad dinámica de la línea para poder transportar más energía que la inicialmente prevista.**

En la [Figura 64](#) se puede apreciar como la ampacidad dinámica puede superar claramente a la nominal del conductor (figura superior) y como una monitorización de la velocidad del viento y de la temperatura del conductor permite concluir que existe una correlación inversa

¹Hablaremos de ampacidad ya que la tensión de trabajo es fija.

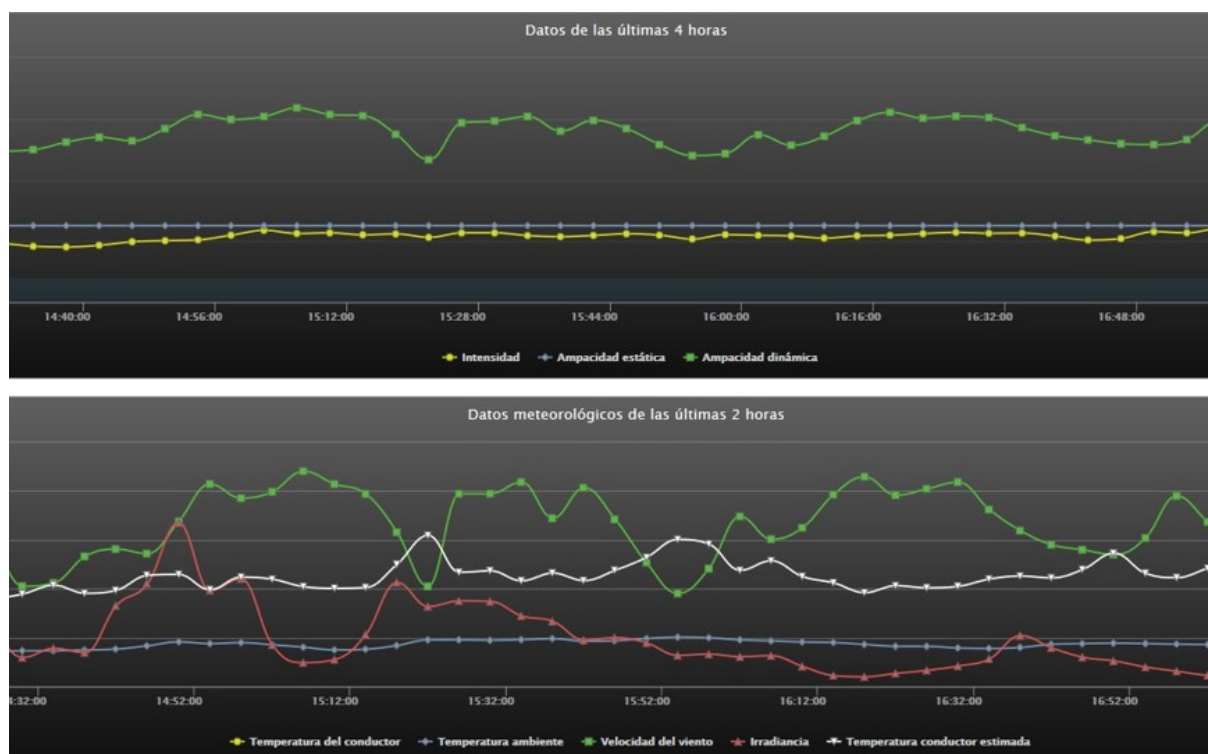


Figura 64. Ejemplos de datos obtenidos en el proceso de calibrado dinámico de líneas de alta tensión. Fuente: Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética de la Universidad de Cantabria

entre ambos parámetros (imagen inferior).

1.12.7. EERR y Telecomunicaciones: Conclusiones

Dado el contexto del presente curso, en el último apartado hemos intentado descubrir algunos vínculos que relacionan las EERR y las telecomunicaciones. Desde la alimentación de sistemas de telecomunicación mediante pequeñas instalaciones fotovoltaicas o eólicas, a la alimentación de sistemas sensores, la monitorización de infraestructuras renovables o el entorno de la I+D, se han presentado diferentes ejemplos, desde lo más conocido a aplicaciones probablemente novedosas para el estudiante.

1.12.8. Introducción a las EERR: Conclusiones

En este apartado de la asignatura nos hemos centrado en comprender **qué son las EERR y por qué surgen**. En relación a este último punto, hemos tratado de comprender en mayor profundidad el denominado **cambio climático**, o calentamiento global. También hemos presentado la **situación actual de las EERR** alrededor del mundo, con un énfasis especial en Europa y España. En este último caso hemos podido ver cómo la situación en nuestro país ha cambiado drásticamente en 2019, lo que nos da una idea de que las EERR constituyen un ámbito tremendamente dinámico y en continua evolución a día de hoy.

Hemos analizado también **por qué las políticas de los gobiernos son importantes**

para las EERR y hemos estudiado los **sistemas de almacenamiento de energía en la red eléctrica**, tratando de comprender por qué son claves en el desarrollo futuro de las EERR. Por último, hemos presentado varios ejemplos de la **relación que existe entre las EERR y las telecomunicaciones** en diferentes aspectos, como los sensores aplicados a infraestructuras renovables.

Una vez finalizada la introducción a esta parte de la asignatura, disponemos ya de un conocimiento suficiente como para enfrentarnos en los siguientes capítulos a conceptos básicos de fuentes de energía renovable tales como la hidráulica, las energías derivadas del mar, la biomasa o la geotermia. Los últimos dos capítulos estarán dedicados a la profundización en la energía solar fotovoltaica y, en menor medida, en la eólica.

1.13. ANEXO: Centrales eléctricas en España (a fecha 2021)

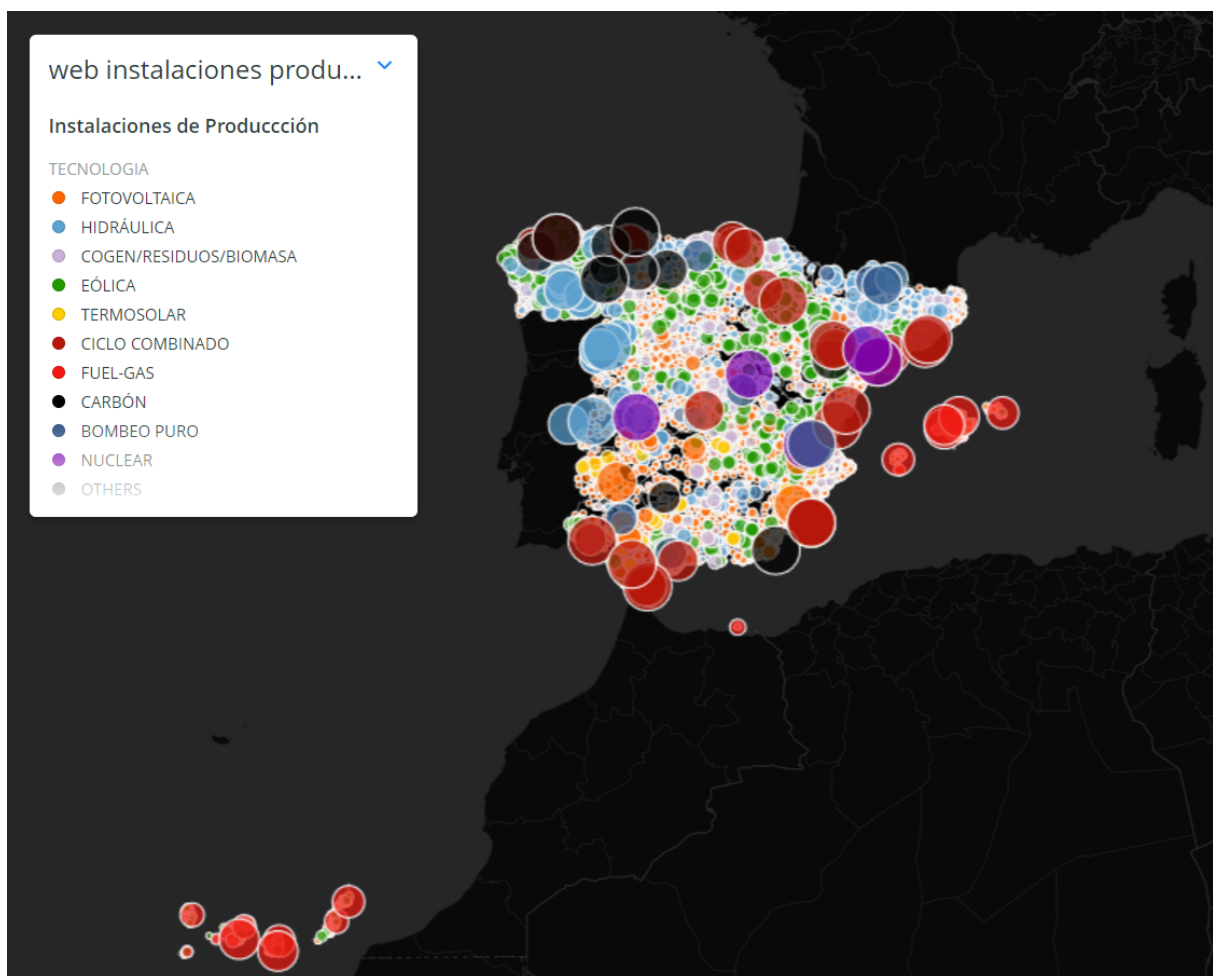


Figura 65. Centrales eléctricas en España (a fecha 2021). Fuente: REE. Enlace: <http://bit.ly/30oC8uQ>

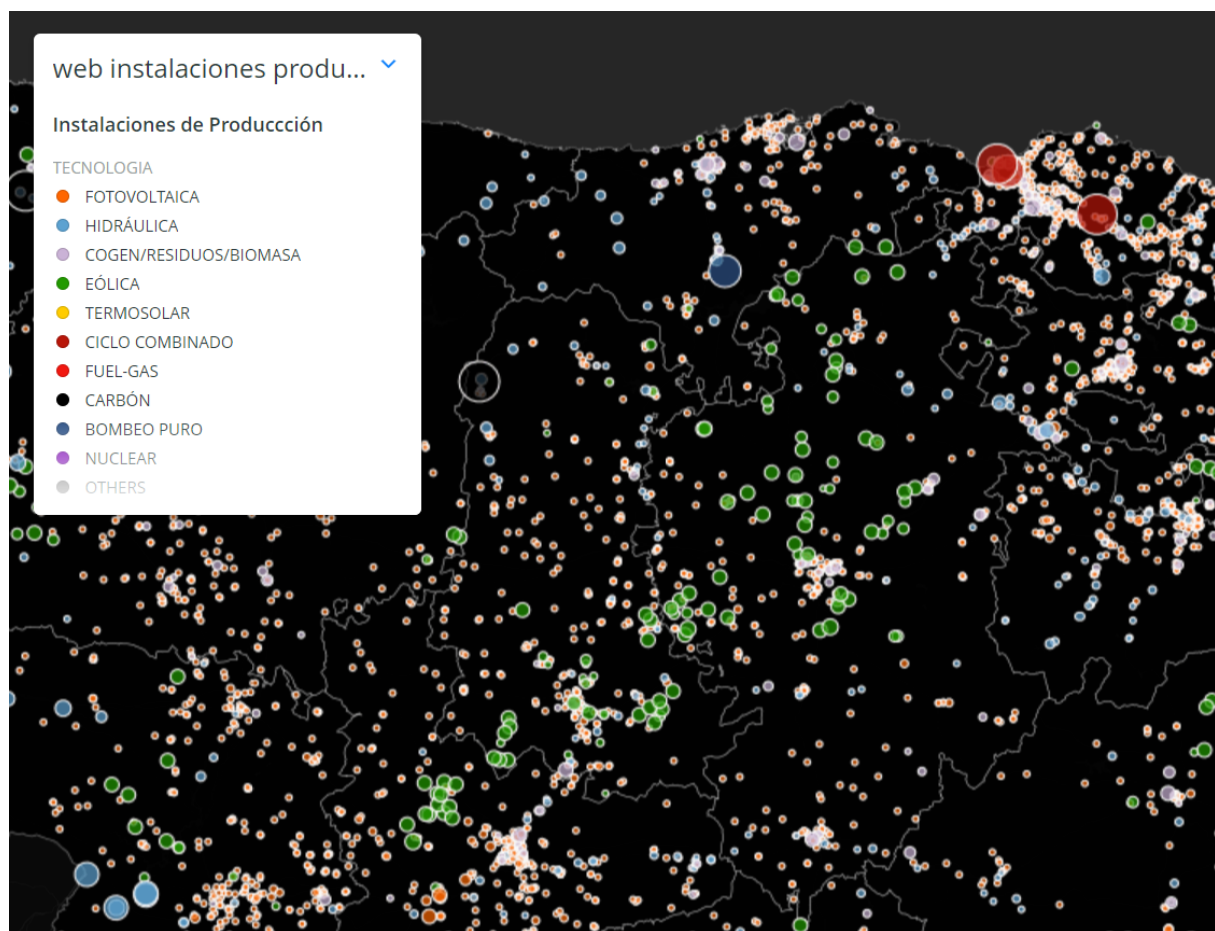


Figura 66. Centrales eléctricas en España (a fecha 2021, detalle de Cantabria). Fuente: REE.
Enlace: <http://bit.ly/30oC8uQ>