



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE BUENOS AIRES – ITBA
ESCUELA DE (TECNOLOGÍA – GESTIÓN)

Análisis de factores para la Aplicación en escala de Energías Renovables en Argentina

AUTOR: Carles, Gabriel Antoine René (Leg. N° 105532)

TUTORA: Sangronis, Marie Angelica

DIRECTOR: Almada, Jorge

**TESIS PRESENTADA PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE MAGÍSTER EN DIRECCIÓN
ESTRATÉGICA Y TECNOLÓGICA**

BUENOS AIRES
SEGUNDO CUATRIMESTRE, 2023

Agradecimientos

Quisiera expresar mi profunda gratitud a mi tutora de tesis, Mari Angelica Sangronis, por su inestimable orientación, apoyo y paciencia a lo largo de mi investigación académica. Sus sabios consejos y su experiencia han sido esenciales para la realización de esta tesis.

También me gustaría expresar mi más sincero agradecimiento a mis universidades, el ITBA y la ESCP por la excepcional formación que he recibido. Sus enseñanzas me permitieron adquirir los conocimientos y habilidades que necesitaba para llevar a cabo esta investigación.

Argentina ha sido mi hogar durante un año, y me gustaría agradecer a este maravilloso país por acogerme tan cálidamente y tratarme con tanta hospitalidad. El tiempo que he pasado aquí ha enriquecido mi vida inconmensurablemente.

Por último, quiero expresar mi eterna gratitud a mis padres por su apoyo incondicional a lo largo de mis estudios. Su amor, sus ánimos y su confianza en mí han sido los cimientos de mi carrera académica.

Mi agradecimiento también a todos los que han contribuido de algún modo a la realización de esta tesis.

Esta tesis es fruto del compromiso, la dedicación y el apoyo de muchas personas, y estoy profundamente agradecida a todas ellas.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	6
Contexto del problema	6
Preguntas claves	8
Objetivo general	10
Objetivos específicos	10
METODOLOGIA	11
Metodología	11
Definición de términos claves – Marco Teórico.....	18
Limitaciones.....	22
CONTEXTO GLOBAL Y CONTEXTO DE LA ARGENTINA.....	23
Producción de energía renovable en el mundo.....	23
Producción de energía renovable en la Argentina.....	25
PRODUCCIÓN DE ENERGÍAS RENOVABLES EXTENSIVAS EN TRES ESCALAS DIFERENTES	27
El caso de una pequeña isla – Tilos.....	27
Panorámica de la isla	27
Potencial en energías renovables	28
Planificación energética.....	30
País aislado de escala mediana – Islandia.....	33
Panorámica del país.....	33
Potencial en energías renovables	35
Planificación energética.....	37
País de escala más grande – Costa Rica.....	40
Panorámica del país.....	40
Potencial en energías renovables	42
Planificación energética.....	44
VENTAJAS Y DESAFÍOS DE LA APLICABILIDAD DE LAS ENERGIAS RENOVABLES EN UNA GRAN ESCALA	48

Costos	48
Beneficios	55
Desventajas.....	61
Desafíos	66
APLICABILIDAD A LA ARGENTINA	76
Condición natural.....	76
Recursos en materias primas y lugares de implementación	79
Uso, actividad económica y electrificación.....	81
Viabilidad financiera de la transición.....	85
Presupuesto y condiciones económicas	89
CONCLUSION	93
Referencias	95
Bibliografía.....	95
Sitios de internet.....	98
Material periodístico	99
Fuentes oficiales	100
ANEXOS.....	105
Anexo A: Consumo de energía según el sector (IEA, 2022)	105
Anexo B: Evolución de los exportes de Costa Rica de 1994 a 2021 (OECD b, 2023).....	106
Anexo C: Consumo de energía según el sector en Costa Rica (IEA, 2023)	106
Anexo D: Producción de energía en los Estados Unidos de 1990 a 2023 (IEA, 2023).....	107
Anexo E: Tabla de consumo de los países en la base de datos de la IEA en 2020	108
Anexo F: Países con los consumos en energía lo más importantes.....	116
Anexo G: Atlas del potencial solar fotovoltaico y del potencial eólico, por este orden	117

Índice de tablas

Figura 1: Emisiones globales de GEI según cada sector (2020)	6
Figura 2: Histograma del reparto del consumo energético de los países.....	13
Figura 3: Estadísticas descriptivas de los datos energéticos de los países de la IEA.....	15
Figura 4: Importante proveedor de energías renovables en 2022 (Statista a, 2023)	24
Figura 5: Cuota de las energías renovables en la producción de electricidad por países (Our World in Data, 2023)	24
Figura 6: Suministro total de energía de Argentina 1990-2023 (IEA, 2023)	25
Figura 7: Mapa de la isla de Tilos en Grecia.....	28
Figura 8: Potencial en energía solar de Tilos (Global Solar Atlas, 2023).....	28
Figura 9: Potencial eólico de Tilos(Global Wind Atlas, 2023)	29
Figura 10: Mapa de Islandia (Capture Atlas, 2023).....	33
Figura 11: Idoneidad geográfica de las centrales geotérmicas eficientes (Coro and Trumpy p8, 2020)	35
Figura 12: Potencial eólico de Islandia continental y costas cercanas (Global Wind Atlas, 2023).....	36
Figura 13: Suministro de energía en Islandia a partir de 1990 hasta 2021 (IEA, 2023)	37
Figura 14: Mapa de Costa Rica (Nations Online, 2023)	41
Figura 15: Potencial en energía solar de Costa Rica (Global Solar Atlas, 2023).....	43
Figura 16: Potencial de energía eólica de Costa Rica (Global Wind Atlas, 2023).....	44
Figura 17: suministro de energía de Costa Rica de 1990 a 2021 (IEA, 2023).....	44
Figura 18: LCOE en 2023 de las diferentes fuentes de energía (Lazard, 2023).....	49
Figura 19: 2021 análisis de LCOE (IEA, 2022)	51
Figura 20: Cálculo del LCOE con un factor de riesgo que tiene en cuenta la intermitencia y otros riesgos (Shen et al, 2020).....	53
Figura 21: Tabla resumen de los valores medios de LCOE observados para las distintas fuentes de energía	53
Figura 22: Mayor y menor impuesto sobre el carbono observado en el papel de Koppl y Schratzenstaller (2022)	56
Figura 23: emisiones de carbono según la fuente de energía (RTE, 2023)	56

Figura 24: Precios de la electricidad en Polonia (izquierda) e Islandia (derecha) de 2012 a 2022 (IEA, 2023) (Statista b, 2023).....	60
Figura 25: Uso del suelo de las distintas fuentes de energía (Ritchie, 2022).....	62
Figura 26: Coste del almacenamiento de electricidad en baterías en 2016 y su coste previsto en 2030 en \$/kWh (IRENA, 2017)	64
Figura 27: Costes, ventajas, inconvenientes y retos de las energías renovables (Lazard 2023) (IEA 2022).....	75
Figura 28: Distribución espacial de la energía hidroeléctrica explotable (Tefera y Kasiviswanathan ,2022).....	77

INTRODUCCIÓN

Contexto del problema

En 2015 se firmó el Acuerdo de París, un hito importante en la búsqueda de limitar las crecientes emisiones mundiales de carbono¹. Este acuerdo tiene como objetivo limitar el calentamiento global por debajo de 2°C para 2050 (United Nations Framework Convention on Climate Change, 2016). Si se profundiza en las emisiones globales de carbono, podemos ver que la energía es el principal emisor de Gases de Efecto Invernadero (GEI)², representando casi tres cuartos de las emisiones totales, como podemos ver en el siguiente gráfico.

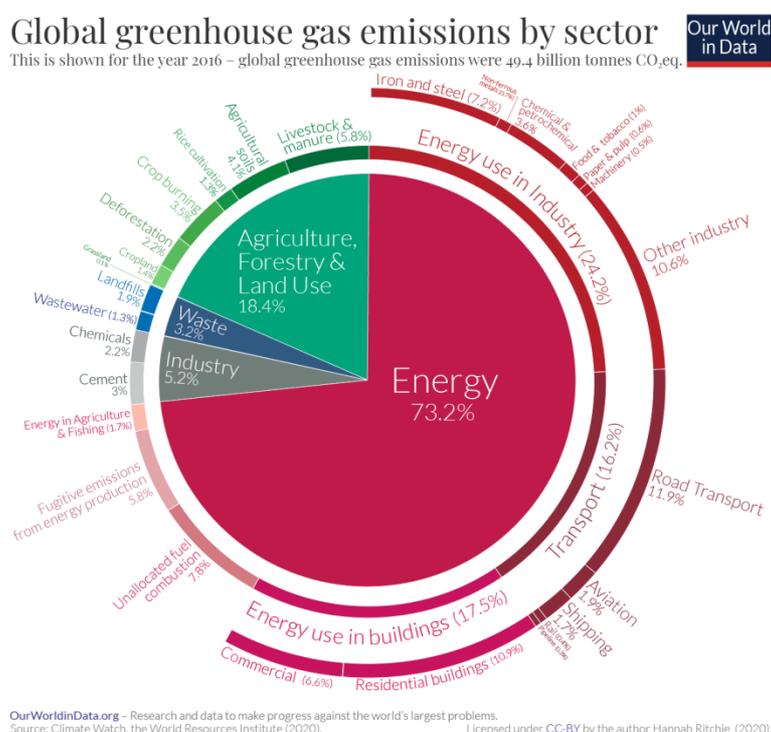


Figura 1: Emisiones globales de GEI según cada sector (2020)

1 Por emisiones de carbono entendemos todo el carbono rechazado a la atmósfera en forma de dióxido de carbono, un gas, como resultado de la actividad humana. Tales actividades pueden consistir en quemar un combustible conduciendo un coche o en aplicaciones industriales.

2 Las emisiones de gases de efecto invernadero corresponden al gas que absorbe y libera parte de los rayos solares. Esta absorción crea un efecto invernadero, es decir de calentamiento de la temperatura de la atmósfera. Dentro de estos gases se incluye el dióxido de carbono (INSEE a, 2023).

Por eso, cuando se quiere reducir las emisiones, la energía debe ser el objetivo principal. Para ello, las energías renovables pueden permitir producir energía con emisiones de carbono bajas o nulas, al tiempo que permiten sustituir la producción de energía basada en el carbón o el gas.

En ese estudio, seguimos la definición de energías renovables del Instituto Francés de Estadística y Estudios Económicos (INSEE) (2021), que las define como potencia "derivada de procesos naturales en perpetua renovación". Correspondiendo a esa definición, incluimos en el ámbito del estudio las siguientes energías renovables:

1. Energía solar
2. Energía eólica
3. Energía hidráulica
4. Energía Geotérmica

Las fuentes de energía bajas en carbono están ahora en el centro de las discusiones que tienen los gobiernos relativo a las decisiones sobre el mix energético del país. En consecuencia, los países y las regiones aspiran cada vez más a introducir más infraestructuras de energías renovables. Lo hacen pasando de un sistema energético basado en centrales de combustión de carbón o gas a parques eólicos, presas hidráulicas o unidades de paneles solares.

Preguntas claves

Problema

En el contexto actual, estamos enfrentando una creciente urgencia de reducir las emisiones de dióxido de carbono y avanzar hacia una matriz energética que sea más respetuosa con el medio ambiente y sostenible a largo plazo. Esta imperativa necesidad surge como respuesta a la amenaza global del cambio climático y los devastadores efectos que este fenómeno está teniendo y podría seguir teniendo en nuestro planeta. Una de las interrogantes más cruciales en esta lucha es entender hasta qué punto las energías renovables pueden desempeñar un papel fundamental en esta transición hacia un futuro más limpio.

La importancia de abordar este tema no puede subestimarse, ya que está directamente vinculada a la búsqueda de soluciones efectivas para hacer frente al cambio climático y minimizar sus impactos negativos en la salud humana, la biodiversidad, la seguridad alimentaria y la estabilidad económica. La transición hacia fuentes de energía más limpias y sostenibles es un pilar esencial en este esfuerzo global, la producción energética siendo uno de los principales emisores de GEI.

Como resultado, los países necesitan por sí mismos cambiar gradualmente hacia sistemas de producción de energía renovable para reducir drásticamente sus emisiones de GEI. Mientras que algunos países han sido capaces de aumentar su producción de energías renovables, otros casi han alcanzado una producción eléctrica totalmente basada en fuentes de energía renovables. Por otro lado, otros países siguen teniendo una proporción relativamente baja de energía renovable en su combinación energética, como Argentina, que depende sólo en una pequeña medida, en torno al 10% de su consumo final de energía (AIE, 2023). Por este motivo, nos interesará comprender cómo y por qué Argentina debería aumentar sus capacidades de energía renovable, basándonos en ejemplos reales de economías que dependen en gran medida de las energías renovables.

Para responder de manera efectiva a este problema, es imperativo llevar a cabo un análisis exhaustivo y riguroso de la aplicabilidad de las energías renovables a gran escala. Esto implica evaluar no solo la disponibilidad y la tecnología detrás de estas fuentes de energía, sino también su viabilidad económica y su impacto ambiental en diversas escalas y contextos. Comprender hasta qué punto estas fuentes de energía pueden ser implementadas de manera práctica y efectiva a gran escala es un paso esencial en la toma de decisiones informadas para combatir el cambio climático y construir un futuro más sostenible para las generaciones futuras.

Por estas razones, el problema general de esta tesis es, en la necesidad de bajar las emisiones de carbono, ¿Cómo la Argentina puede incrementar su dependencia en energías renovables?

Objeto de estudio

El objeto de estudio de esta tesis es de las economías altamente dependientes de energías renovables en tres escalas poblacionales.

Pregunta general

En el contexto de la urgente necesidad de reducir las emisiones de dióxido de carbono y avanzar hacia una matriz energética más sostenible, ¿En qué condiciones se encuentra Argentina para reducir las emisiones relativas a su sistema energético escalando la producción de energías renovables basándose sobre aplicaciones a escalas menores?

Preguntas específicas

¿Cuál es la estructura actual del sistema energético argentino comparado, cuáles son sus capacidades existentes en materia de energías renovables y como se compara con el resto del mundo?

¿Cuál es la estructura de los sistemas energéticos de las economías de tres tamaños diferentes que dependen altamente de las energías renovables?

¿Cuáles son los cambios, costes, limitaciones, beneficios y ventajas de esta estrategia?

Conociendo la realidad de los sistemas energéticos de tres países ¿de qué manera es factible aplicarla a la Argentina para aumentar su producción de energías renovables?

Objetivo general

Objetivo general

Más concretamente, el objetivo general de esta tesis es de conocer la aplicabilidad de las energías renovables en Argentina a partir de la información de tres casos con escalas crecientes.

Finalidad

La finalidad del estudio es de entender los factores que influyen e impactan las decisiones de los estados? sobre la creación de nuevas capacidades de producción de energías renovables, tanto como entender las ventajas y desafíos que vienen con incrementar su dependencia en energías renovables, para entender como las energías renovables pueden tener una más grande importancia en sistemas energéticos. Al fin, esta más grande parte de energía producida con fuentes de energías renovables contribuyera a la reducción de las emisiones globales.

Objetivos específicos

1. Tomar conocimiento del sistema energético de la Argentina, sus capacidades actuales en energías renovables y como se comparan con los otros países del mundo.
2. Conocer la aplicación de energías renovables en lugares altamente dependientes en aquellos, y entender los costos tanto como los beneficios.
3. Analizar cómo se puede incrementar la producción de energía renovable en la Argentina con las enseñanzas de escalas menores.

METODOLOGIA

Metodología

La tesis está respaldada por una investigación con fuentes secundaria, incluyendo artículos académicos, noticias y material publicado por organismos oficiales.

En el curso de ese proyecto, la información específica de cada país fue obtenida a través de fuentes oficiales. Esto incluye los recursos gubernamentales, es decir, las agencias de energía, los ministerios correspondientes o la agencia responsable de la divulgación de estadísticas. También se basa en los informes y análisis proporcionados por organismos internacionales en la materia. Por ejemplo, en el transcurso del primer capítulo de esta tesis, se basa en los datos proporcionados por la Agencia Internacional de la Energía (IEA) que enumera casi todos los países del mundo y proporciona información sobre su consumo y suministro de energía, así como sobre su consumo eléctrico y la fuente de esa energía. La IEA es un organismo independiente responsable del debate mundial sobre asuntos relacionados con la energía. Fundada en 1974, la agencia proporciona análisis, datos o recomendaciones específicas para cada país sobre normativa energética. Proporciona una herramienta que permite acceder a datos específicos de cada país sobre su consumo y suministro de energía, así como a otra información más específica (IEA, 2023).

Por otro lado, toda la información o los cálculos exhaustivos de los posibles sistemas energéticos que utilicen únicamente energías renovables se proceden de investigaciones y trabajos académicos. De hecho, como no entra dentro del ámbito de este estudio, se prefirió basarse en los conocimientos y conclusiones de la comunidad académica, que ha sido capaz de llevar a cabo búsquedas en profundidad sobre el tema que se interesa, la escalabilidad de las energías renovables, en lugar de intentar llevar a cabo esa investigación por nuestra cuenta de forma incompleta. Este material fue identificado a través de buscadores académicos, tal como ScienceDirect o EBSCO, que compilan material y conocimiento académico a través de una base de artículos académicos. Durante este proceso, se operó también una investigación respaldada en artículos académicos, que sirvieron también para identificar otros artículos cuando fueran citados adentro del papel.

Cálculo de los costos de energía

Aunque hay muchas formas de calcular el coste de la energía para comparar una fuente con otra, cualquier método de cálculo se basa en sus propios supuestos e hipótesis. Una medida muy extendida para calcular el coste de la energía es el Coste Nivelado de la Energía (LCOE). El LCOE corresponde a un valor descontado de todos los ingresos y costes derivados de la creación de una determinada infraestructura de producción de energía. Tiene en cuenta todas las entradas y salidas de dinero durante la vida útil de un proyecto energético, desde su construcción hasta su desmantelamiento, incluido su periodo de explotación. Los resultados se expresan en términos monetarios por cantidad de energía producida; la medida más utilizada para el LCOE es \$/kWh. Como cualquier otro cálculo de costes, todo depende de las suposiciones que se hagan para el cálculo. Algunos costes pueden incluirse o no en el cálculo, lo que en última instancia repercute en los resultados del mismo. Dentro de estos costes, identificamos los costes de desmantelamiento, el valor residual, los costes adicionales de conexión a la red o los costes de energía de respaldo para las energías renovables. Además, al ser la medida LCOE un valor descontado, el factor de descuento utilizado para calcularlo tiene un impacto crucial en el resultado final. Dicho factor de descuento también es el resultado de los diferentes supuestos realizados (Jayet, 2016). Por lo tanto, el LCOE se puede escribir con la siguiente fórmula:

$$LCOE = \frac{\text{Inversión inicial} + \sum_{i=1}^t \frac{\text{Coste de vida útil del proyecto}^3}{(1+r)^t}}{\sum_{i=1}^t \frac{\text{Energía producida al tiempo } t}{(1+r)^t}}$$

donde t = vida útil de la infraestructura

r = tasa de descuento aplicada

³ Los costes de explotación durante la vida útil incluyen todos los gastos en los que se incurre durante el periodo del proyecto energético, lo que conlleva el mantenimiento o el coste de insumos como el combustible para las centrales de gas o carbón.

Determinación de una gran escala

Como hemos visto anteriormente, las energías renovables ya están implantadas en un puñado de países, algunos de los cuales dependen en gran medida de ellas, con las ventajas e inconvenientes que ello conlleva. Sin embargo, hemos visto que su aplicación extensiva en los sistemas energéticos de los países se limita por ahora a países relativamente pequeños, que como resultado tienen una demanda energética inferior a la de los países más grandes e industrializados. A lo largo de esta sección, se analizará cómo pueden aplicarse las energías renovables a gran escala.

Para llevar a cabo ese análisis, es necesario definir qué entendemos por implantación a gran escala de las energías renovables. Para ello, hemos recopilado información de la base de datos de la IEA (IEA, 2023) sobre el consumo anual de energía de los países en 2020. De los 172 países presentes en la base de datos, 144 proporcionaron información sobre la energía consumida internamente en el transcurso del año. Hemos enumerado estos países, que han proporcionado el siguiente histograma de reparto del consumo de energía en 2024.

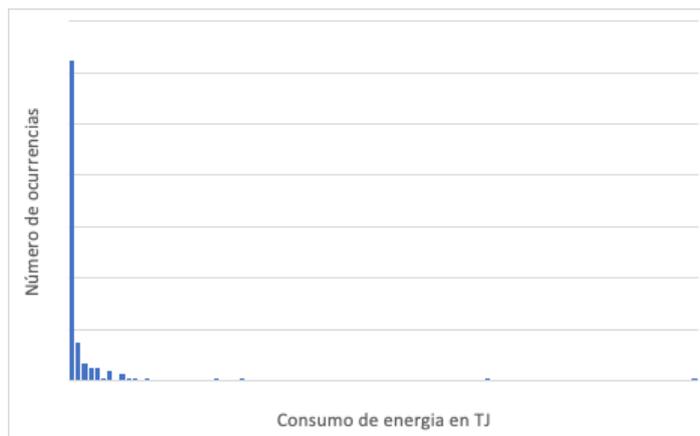


Figura 2: Histograma del reparto del consumo energético de los países.

La tabla anterior presenta la distribución de los datos en la muestra de 144 países con datos disponibles sobre su consumo anual de energía en 2020. Esto permite comprender mejor el conjunto de datos, con el fin de determinar a partir de qué consumo de energía estimamos que el país es un gran consumidor de energía. En la figura anterior, por tanto, podemos observar una distribución de los

4 La tabla completa con los datos de todos los países está disponible en el anexo E.

datos muy sesgada positivamente, con algunos valores atípicos claros a la derecha. Esto se explica por una importante presencia en los datos de países pequeños, con consumos energéticos resultantes muy bajos, lo que influye en la curva hacia el lado izquierdo del gráfico. Por otro lado, podemos ver que los mayores consumos son menos frecuentes, siendo el valor atípico China y Estados Unidos con consumos muy grandes, explicados por sus actividades económicas.

Para tener una idea de cuál es el consumo a gran escala frente al resto de países, se ha aplicado un rango intercuartílico, que permite separar los valores centrales del 50% de la muestra de los extremos. Se trata de una medida estadística que representa la amplitud o dispersión de un conjunto de datos, midiendo el rango entre el 75º valor más alto y el 25º más bajo de un conjunto de datos. Es una medida útil para comprender la variabilidad dentro de un conjunto de datos, minimizando al mismo tiempo la influencia de los valores extremos. El concepto de cuartiles y el rango intercuartílico es una parte fundamental de la estadística descriptiva, y su desarrollo es el resultado de las contribuciones colectivas de muchos estadísticos y matemáticos a lo largo de los años.

A modo de ejemplo, la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) utiliza el rango intercuartílico para evaluar la comparabilidad de las transacciones financieras (OCDE, 2022). Es decir, estima que el precio de las transacciones debe situarse entre el primer cuartil y el tercero. Este intervalo contiene el 75% de las observaciones de los conjuntos de datos, y fuera de él se encuentran los valores inferior y superior del 25%. Como resultado, podemos utilizar el tercer cuartil de esta muestra como punto de partida para estimar que un país tiene un gran consumo de energía en relación con los demás. La tabla siguiente presenta los intervalos intercuartílicos para los datos observados, basados en la información de la IEA (2023).

	PIB en 2015	Población	Consumo de energía en 2020	Producción de energía	Consumo final en energía
	bn USD	millón	TJ	TJ	TWh
Mínimum	2.27	0.16	20 638.00	0.77	0.33
1er Cuartil	19.37	5.15	175 138.00	144.76	8.69
Promedio	557.35	51.26	2 676 113.94	3 797.98	170.30
Mediana	68.01	11.75	511 975.00	593.06	20.86
3rd Cuartil	333.08	38.28	1 436 111.75	2 349.32	81.18
Máximum	19 278.19	1 410.93	91 352 263.00	117 060.83	7 424.99
Cuenta	148	148	144	140	140

Figura 3: Estadísticas descriptivas de los datos energéticos de los países de la IEA

Así, el tercer cuartil de consumo energético es de 1.436.111,75 TJ consumidas en 2020. En consecuencia, consideraremos a gran escala todos los países con consumos energéticos superiores o iguales al valor mencionado, ya que están por encima de lo que cabría esperar. La lista de países afectados está disponible en el anexo F.

Al igual que cuando se habla de la escalabilidad de las energías renovables a gran escala, es importante tener en cuenta que los países tienen contextos y geografías muy diferentes. Así, en la mencionada lista a gran escala, Bélgica o Vietnam tienen contextos geográficos diametralmente opuestos y, en consecuencia, siguen estrategias de energías renovables diferentes. Así pues, a la hora de profundizar en las aplicaciones específicas de las energías renovables a las economías a gran escala, se utilizará Argentina como país de prueba para dicha aplicación. De hecho, Argentina es el 31º país del mundo que más energía consume, con un 0,56% del consumo mundial de energía.

A modo de comparación, Islandia y Costa Rica, estudiados anteriormente, ocupan en esa tabla los puestos 120 y 113 respectivamente según su consumo en energía en 2020. Mientras tanto, Argentina consumió más de 14 veces lo que Costa Rica en el mismo año.

Elección de los lugares de interés

Para comenzar con la escala más pequeña, el estudio se centró en la isla de Tilos, esta isla ha sido elegida tras la investigación sobre los proyectos europeos en curso para proyectos de implantación de energías renovables. Dentro de los proyectos identificados por la propia Unión Europea (Balogh, 2021), la isla de Tilos fue seleccionada por la disponibilidad de información para la isla, es decir, por los artículos académicos y las informaciones detallada por la empresa dueña del sistema energético de Tilos.

Tras lo que, siguiendo su alta participación de energías renovables en su producción de electricidad, siendo ambos países punteros en la categoría (Our World in Data, 2023), además de presentar las ventajas de ofrecer una amplia literatura académica sobre su cambio a energías renovables, Islandia y Costa Rica fueron seleccionados para formar parte del análisis. También ofrecían la posibilidad de presentar una escala de tamaño diferente, ya que Islandia es una isla de menos de 300 000 habitantes, mientras que Costa Rica es un país con más de 5 millones de ciudadanos.

Por otro lado, este proyecto de tesis siendo presentado en el transcurso de una maestría en el Instituto Tecnológico de Buenos Aires, la aplicación se hizo sobre la Argentina. Se enfoca en el país en el cual la universidad está ubicada por coincidir más con el contexto nacional del país.

En el transcurso de esta tesis, se realizó una entrevista de un profesional de la industria de las energías renovables para tener un análisis y argumento empírico que provienen de la industria en sí misma. Esta entrevista tomo lugar por llamada, con Lucas Stravato que trabaja en la parte financiera de una empresa productora de energías renovables. Se seleccionó un perfil de financiero al fin de entender la opinión sobre los impactos económicos de la escalabilidad del uso de energías renovables, por parte de un profesional en el sector del financiamiento de los proyectos de energías renovables.

Variables del estudio

Este proyecto está respaldado sobre tres variables mayores. La primera, el contexto geográfico, corresponde en las características de la región de estudio, incluyendo su exposición solar, el viento promedio, la topografía, las disponibilidades en agua o las diferentes altitudes. Segundo, viene la red eléctrica, que corresponde a la conexión entre la producción, la distribución y el consumo de electricidad en una cierta región o país. Esta variable incluye el concepto de conexión de las infraestructuras de producción al sistema eléctrico. Y tercero viene el contexto económico, pero más específicamente adentro de este concepto se usará más los datos de consumo de energía de un país

o región, que corresponde a la energía total consumida en un región teniendo en cuentas los consumos de varios sectores, tal como la industria, el transporte o el consumo residencial.

Definición de términos claves – Marco Teórico

La **energía**, elemento central de esa tesis, se define como la potencia de algo como la electricidad o el petróleo que puede realizar un trabajo, como proporcionar luz y calor (Cambridge Dictionary, 2023). En consecuencia, la energía se ha utilizado a lo largo del tiempo para que la humanidad disponga de máquinas que realicen trabajos que los hombres no podrían y/o para mejorar la productividad económica.

Un concepto importante observado a lo largo de esta investigación es el de **escalabilidad**. Aunque escalabilidad es un término amplio utilizado en economía, Palmié et al. (2023) revisaron la literatura para comprender la aplicación del término. Como resultado, pudieron derivar la siguiente definición "La escalabilidad describe un aumento en el tamaño de un sujeto focal que va acompañado de un aumento mayor que proporcional en el rendimiento resultante de dicho sujeto". Al referirnos a este concepto en este trabajo, entendemos el escalado de las capacidades de las energías renovables por el aumento continuo que se necesita y se va a realizar en las capacidades existentes, y las mejoras de rendimiento subyacentes resultantes.

Se encuentra en dos formas. En primer lugar, entendemos por **energía primaria** la fuente original de energía antes de ser procesada. En segundo lugar, la **energía final** es la energía en la forma en que se va a consumir. Un ejemplo sería el petróleo crudo que se extrae en las plataformas petrolíferas, que es energía primaria, y la gasolina que se introduce en los vehículos de motor, que es la energía final. Es importante disociar los términos de **energía** y **electricidad**, esta última es una forma una energía final. "La electricidad es el flujo de energía o carga eléctrica" (US Energy Information Administration, 2023). Es una forma secundaria de energía, y se utiliza para la iluminación, la electrónica o la calefacción.

Un aspecto importante que hay que tener en cuenta al estudiar la electricidad es la **eficiencia**, que se mide en una escala de 0 a 1, calculando la energía final producida a partir de la energía primaria procesada. Depende principalmente del uso, del proceso industrial y de la energía final producida a partir de la energía primaria. Esta medida es particularmente relevante para las energías fósiles, mientras las energías renovables tienen una eficiencia muy alta, a menudo cercana a 1, por lo que solemos asociar las energías renovables con el ahorro energético.

Por **energías de origen fósil** entendemos las energías finales procedentes de energías primarias extraídas de la tierra como rastro fósil de la presencia de vida en épocas anteriores. Entre estas energías se encuentran el carbón, el petróleo o el gas natural. Por otro lado, las energías renovables

se definen como "Energías derivadas de procesos naturales en perpetua renovación, en particular las de origen solar, eólico, hidráulico, geotérmico o vegetal (madera, biocarburantes, etc.)". (INSEE, 2021).

En el ámbito de nuestro estudio, incluiremos las siguientes cuatro fuentes de energía renovable:

1. **Energía solar:** se refiere a la energía radiante emitida por el sol, que puede convertirse en electricidad o calor mediante paneles solares (células fotovoltaicas). El potencial en energía solar se puede medir con la Irradiación Directa Normal (IDN), que consiste en la cantidad de radiación solar que recibe una zona en rayos directos del sol, que después esta convertida en electricidad por paneles solares.
2. **Energía eólica:** se genera aprovechando la energía cinética de las masas de aire en movimiento mediante turbinas que convierten la energía mecánica del viento en electricidad.
3. **Energía geotérmica:** se obtiene de las reservas de calor bajo la superficie de la Tierra para producir electricidad o proporcionar calefacción y refrigeración directas.
4. **Energía hidráulica:** se refiere a la energía cinética del agua que fluye, normalmente en ríos o presas, convirtiendo mediante turbinas el movimiento del agua en electricidad.

Los principales ámbitos en los que se utiliza la energía son la **industria**⁵, que quema gas para fundir metales, por ejemplo; el **transporte**⁶, que utiliza petróleo para propulsar vehículos de motor o electricidad para mover trenes; el uso **comercial**⁷, que incluye la calefacción de tiendas o el alumbrado público; y, por último, el uso **residencial**⁸, que consiste en calefacción, refrigeración u otros usos eléctricos en los hogares. Es importante señalar que, dentro de estas categorías, el uso industrial de la energía es el más importante a nivel mundial. Por otro lado, el transporte es el segundo consumidor más importante de energía. Esta información se detalla en la figura del anexo A, donde el consumo

5 Actividades de producción de "bienes materiales destinados al mercado", incluidas las actividades de fabricación o de extracción (INSEE b, 2023). Las actividades industriales están a menudo asociadas a actividades de fusión, para las obras metálicas en particular, necesarias altas temperaturas obtenidas mediante la combustión de gas.

6 Todo transporte de personas o mercancías por vía aérea, marítima o terrestre efectuado por vehículos de motor, incluidos aviones, barcos o automóviles.

7 Actividades realizadas por empresas que prestan servicios o venden bienes en lugar de producirlos. Contabilizamos como actividades comerciales la reventa, la prestación de servicios o las actividades de almacenamiento.

8 Por residencial entendemos toda la vida doméstica y su consumo final de energía hacia los locales de vivienda del hogar.

doméstico y comercial se incluye en la categoría "Edificios". Es importante en esa investigación entender que cada fuente de energía primaria tiene su propia mezcla de consumo por sector según su conveniencia para el sector. La Agencia Internacional de la Energía (IEA) proporciona información detallada a nivel mundial del consumo sectorial de cada una de las fuentes de energía primaria.

En su artículo sobre los sistemas de suministro de servicios energéticos, Groscurth et al. (1995) definen los **sistemas energéticos** como "sistemas técnicos y económicos que satisfacen la demanda de energía", en los que ésta se ve influida por muchos factores, como los precios, la normativa o las preferencias de los clientes. Dentro de un sistema energético se incluyen todos los pasos desde la extracción de la materia prima, por ejemplo, el petróleo crudo, hasta el consumo del cliente final. Esto incluye muchos pasos complejos y diversos, como la producción, el almacenamiento y la distribución de electricidad. Los sistemas energéticos se utilizan para satisfacer la demanda de los distintos sectores, como en la tabla anterior, que son el industrial, el del transporte, el residencial y el comercial. En el curso de esta investigación, utilizaremos la palabra sistema energético para describir todo el sistema desde la planificación, la producción hasta el consumo, para los lugares de interés.

También se tiene que considerar y definir el tipo de red eléctrica. Países suelen tener **macro redes**, que son redes que conectan los actores de la energía a los consumidores, incluyendo la distribución y la transformación. Estas redes son pensadas para cubrir ambas largas superficies de terreno tal como largos consumos de electricidad. Como ejemplo, en Europa la red mayor cubre casi toda la superficie de la Europa continental con sus necesidades en electricidad. Sin embargo, se están desarrollando nuevos tipos de redes que se llaman **microrredes**, que consisten en conjuntos más pequeños para pequeñas comunidades, a menudo aisladas, con centros de producción más cercanos de lugares de consumición y todo esto interconectado en muy pequeña escala, que puede ser escala de un pueblo o de un barrio.

También, en el transcurso de esta tesis de máster, cuando se estudia los sistemas energéticos, se interesa más por el **consumo** – la cantidad de energía utilizada en un país en momento preciso - de energía que por el **suministro** – cantidad de energía producida en un país en un momento preciso - energético. La Agencia Internacional de la Energía, que se utilizará a lo largo de esta tesis, al proporcionar el desglose del consumo de energía, ofrece una categoría denominada electricidad, sin mencionar cómo se ha producido esta electricidad. En cambio, el desglose del suministro de energía proporciona información sobre todas las fuentes de energía. Por lo tanto, en el transcurso de este proyecto, supondremos que la oferta es igual a la demanda de energía y, en consecuencia, la combinación energética de los países se presentará utilizando el gráfico de la IEA de energía total suministrada.

Este proyecto también usa abreviaciones por medidas de potencias eléctricas, tiempo o superficie. Estas abreviaciones son las siguientes:

1. J por Joule, unidad de potencia que corresponde a una fuerza de 1 Newton, desplazado a un metro de distancia de su punto de aplicación
2. W por Watt, unidad de potencia en energía, corresponde a 1 Joule por segundo
3. M mayúsculo para mega, que corresponde a 10^6 , también se usa k para kilo (10^3), G para giga (10^9) y T para tera (10^{12}) o Peta (10^{15}). Se usan sobre todo en el contexto de calcular consumo o producción de electricidad o energía, como los MW o TJ, que son Mega Watt o Tera Joule
4. m minúsculo para metros, usado por ejemplo en m/s, que son metros por segundos, unidad de velocidad
5. s por segundos
6. h por horas, se usa por ejemplo en la electricidad en la unidad kWh (kilo Watt por hora)

Limitaciones

Limitación 1: Este proyecto se basa en gran medida en documentos oficiales publicados por gobiernos e instituciones nacionales. Como resultado, aunque permite disponer de datos precisos, estos datos podrían presentarse de forma optimista, creando en última instancia un sesgo con respecto al contexto real y a las acciones de los gobiernos en materia de energías renovables y cambio climático.

Limitación 2: La energía nuclear, que también es una fuente de energía con muy pocas emisiones de carbono y no es un combustible fósil ya que no es el resultado de la combustión de restos de plantas y animales antiguos que han sufrido procesos geológicos durante millones de años, queda fuera del alcance de nuestro estudio. El estudio analizó únicamente las fuentes de energías renovables, entre las que no se incluye la energía nuclear, frente a los combustibles fósiles.

Limitación 3: Este proyecto no estudia todos los tipos de energías renovables, ni la investigación y el desarrollo en torno a las energías renovables de nuevo desarrollo especialmente adaptadas a los países estudiados. Esta investigación sólo se centró en las fuentes de energías renovables mencionadas a efectos de simplificación.

Limitación 4: En el transcurso de este proyecto, se tratan de recursos primarios y de su disponibilidad en determinados países. En aras de la simplicidad, no se disoció la ubicación y el propietario de la empresa minera. Es decir, consideramos que pertenece a Argentina una tonelada de litio extraída en Argentina por una empresa estadounidense.

CONTEXTO GLOBAL Y CONTEXTO DE LA ARGENTINA

Producción de energía renovable en el mundo

Consideradas como una de las soluciones clave para hacer frente al cambio climático, cada vez se confía más en las energías renovables. La Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA) ofrece un panorama de las capacidades instaladas actualmente, las medidas adoptadas y la implantación de sistemas de energías renovables. Además, ofrece indicaciones sobre las próximas tendencias del sector y las medidas que deben adoptarse para alcanzar la energía neta cero en 2050.

En general, pone de manifiesto que no se están respetando los objetivos fijados tras los acuerdos de París para alcanzar el cero neto y, además, que la diferencia entre lo que se espera y lo que se está haciendo en la actualidad aumenta cada año. A nivel mundial, los países están aumentando su capacidad de energía renovable, así como su cuota de energía generada a partir de fuentes renovables, pero esto es insuficiente en relación con sus objetivos. Esto se debe a la incapacidad de las políticas y normativas para avanzar sistemáticamente en la dirección correcta, lo que se explica por los cambios de gobierno con visiones e intereses dispares sobre el sistema energético de su país (IRENA, 2023).

Haciendo zoom en el aumento de la producción de energías renovables, podemos ver que se aceleró en gran medida en los últimos años, desde 2020. La capacidad instalada de energías renovables casi se ha multiplicado por 2 entre 2018 y 2022. Esto se ha hecho con una importante adición de eólica terrestre, así como de infraestructuras de energía solar fotovoltaica, ya sea para aplicaciones de macro red o para consumo directo local y de microrred. En general, la energía solar es la que más éxito está teniendo y en la que más se está confiando para proyectos actuales y futuros. Su capacidad se ha más que duplicado de 2019 a 2022 (AIE, 2023).

En términos de capacidad instalada, según la tabla siguiente, se puede ver que China y EE.UU. están a la cabeza con amplias capacidades instaladas en sus territorios en 2022. Sin embargo, esto puede verse contrarrestado por el hecho de que, al tratarse de economías enormes, están consumiendo una enorme cantidad de energía y, como resultado, las energías renovables podrían representar una pequeña parte de su combinación de suministro energético.

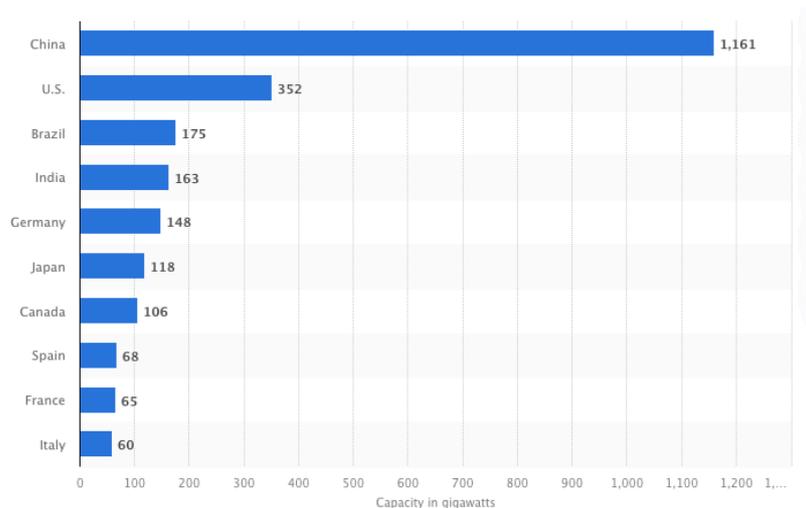


Figura 4: Importante proveedor de energías renovables en 2022 (Statista a, 2023)

Por otro lado, la siguiente tabla proporciona la cuota de energías renovables en su mix de producción eléctrica para las principales economías. A este cuadro se añaden Costa Rica, Islandia y Grecia, ya que se estudiarán en las siguientes páginas de este proyecto. Se observa que Brasil es la gran economía con mayor cuota de energías renovables en su mix eléctrico, con sus importantes infraestructuras hidroenergéticas. Sin embargo, no alcanza el nivel de Costa Rica ni de Islandia, que son países que priorizan mucho su producción de energía renovable.

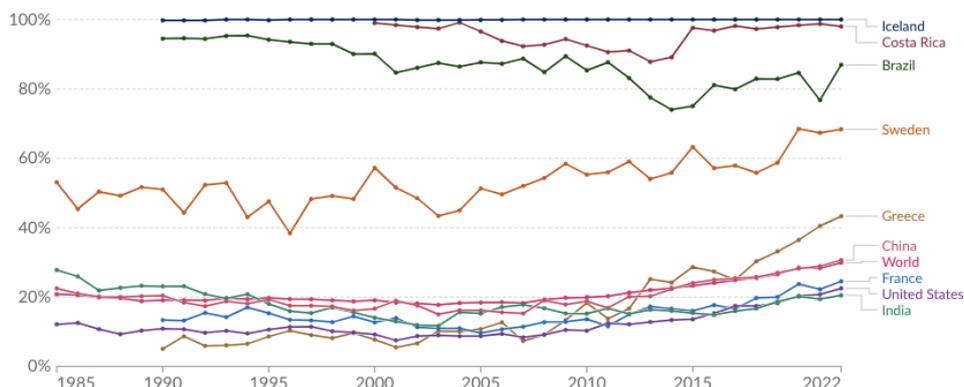


Figura 5: Cuota de las energías renovables en la producción de electricidad por países (Our World in Data9, 2023)

9 Fuentes usadas en el sitio Ember's Yearly Electricity Data; Ember's European Electricity Review y Energy Institute Statistical Review of World Energy.

Producción de energía renovable en la Argentina

En cuanto a la producción de energía renovable en Argentina, actualmente es limitada. De hecho, la OCDE proporciona cifras sobre la producción de energía renovable en los diferentes países del mundo (OECD Data, 2023). Allí podemos ver que Argentina ocupa un lugar muy bajo en la tabla que clasifica la proporción de energía renovable en el suministro de energía primaria. El país sólo obtiene el 8,1% de su energía primaria a través de energías renovables.

En la actualidad, Argentina depende en gran medida tanto del petróleo como del gas natural, como puede verse en la siguiente figura. La electricidad, por su parte, se produce principalmente con gas natural, con una contribución también significativa de la energía hidráulica y nuclear. Argentina consumió 2,15 PJ de energía en 2020, de los cuales sólo el 10,43% procedía de recursos renovables, es decir, energía hidráulica y biocombustibles y residuos. Esta figura incluso bajo al 8% en 2023 según las informaciones de la OCDE. En cuanto al consumo de energía, ascendió a 127,67 TWh, de los cuales el 25,96% procedía de fuentes de energía renovables, es decir, biocombustibles, energía eólica, energía hidroeléctrica y, en muy pequeña medida, energía solar (IEA10, 2023).

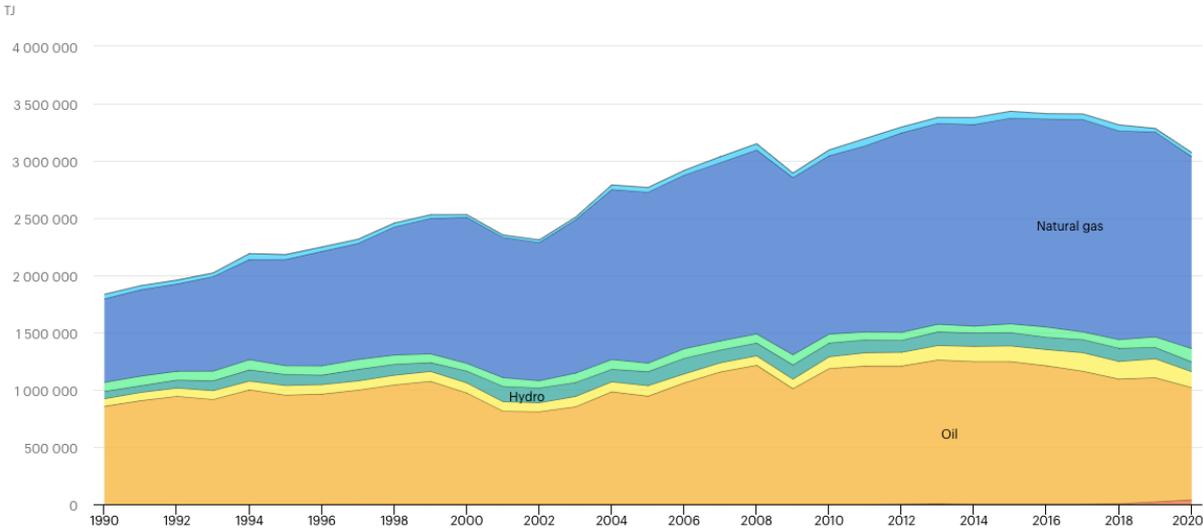


Figura 6: Suministro total de energía de Argentina 1990-2023 (IEA, 2023)

Por lo que respecta a las capacidades de energía renovable instaladas actualmente, están muy dominadas por las infraestructuras hidroeléctricas del país, que representan alrededor del 70% de la

10 En las referencias, en enlace llega a la página general de la IEA. Las informaciones del párrafo y del grafico fueron encontradas en la página dedicada a la Argentina del mismo website.

energía renovable producida. Sin embargo, el país ha observado un aumento de sus capacidades renovables, con una importante adición de capacidades eólicas y, en menor medida, de capacidades solares fotovoltaicas desde 2018 (IEA, 2023).

Las capacidades hidroeléctricas en Argentina se ubican mayormente en el límite entre la provincia de Neuquén y Río Negro, en la provincia de Entre Ríos sobre el Río de la Plata y en la provincia de Corrientes para las centrales más grandes (Devoto, 2006).

Por otro lado, las capacidades eólicas crecieron por un factor mayor a 5 en 5 años, desde 2018. Los proyectos más grandes se ubican casi exclusivamente en el sur del país, y en las provincias de Chubut y Santa Cruz, con otros proyectos también en la provincia de Buenos Aires. Se espera que estas capacidades sigan creciendo en los próximos años, con una previsión de representar el 23% de la producción del país en 2035 (Power Technology, 2023).

Por último, los proyectos de energía solar fotovoltaica crecieron casi 10 veces entre 2018 y 2021. Estas capacidades se están instalando en gran medida en las regiones del oeste y noroeste del país, como la provincia de San Juan (Bragagnolo et al, 2022).

PRODUCCIÓN DE ENERGÍAS RENOVABLES EXTENSIVAS EN TRES ESCALAS DIFERENTES

El caso de una pequeña isla – Tilos

Panorámica de la isla

Tilos es una isla griega perteneciente al archipiélago del Dodecaneso. Está situada entre las islas mayores de Rodas y Kos. Es una isla cubierta de pueblos, altas montañas, fértiles llanuras costeras y escarpadas costas rocosas. La capital de la isla es Megalo Chorio, situada en la parte interior de la isla, junto al otro pueblo principal, Livadia, que alberga el puerto que conecta la isla con otras islas del Dodecaneso. La isla es accesible en línea a través de estos transbordadores procedentes de islas mayores del archipiélago, no tiene conexión directa por ferry con el continente. La isla cuenta con dos centros de salud es los dos pueblos principales. Una carretera principal une la parte norte con el sur de la isla, así como carreteras secundarias. Pequeñas montañas cubren la isla, alcanzando la mayor de ellas una altura de 653 metros sobre el nivel del mar (Municipality of Tilos, 2023).

La isla tiene una superficie total de 64.525 m² y contaba con unos 500 habitantes en el último censo (Municipality of Tilos, 2023). La población local vive de la cría de cabras y de la pesca, y la población aumenta hasta los 800 habitantes en verano con la llegada de temporeros, el turismo y las familias Tilotas que se marchan a Atenas o Rodas (Hope, 2021). Se encuentra a unos 30 kilómetros de las costas continentales turcas y a unos 330 kilómetros de las costas continentales griegas. A continuación, se muestra el mapa de la isla, con los lugares más importantes de la isla para su actividad turística, las principales infraestructuras y el punto más alto de la isla.



Figura 7: Mapa de la isla de Tilos en Grecia

Potencial en energías renovables

En cuanto al potencial de energía renovable de Tilos, se examina tanto el potencial fotovoltaico como el eólico.

En general, la isla tiene una IDN media anual de 1.958,2 kWh/m² (Global Solar Atlas, 2023), con 78 días de lluvia al año y 2.775 horas de luz solar al año (Greek Boston, 2023).

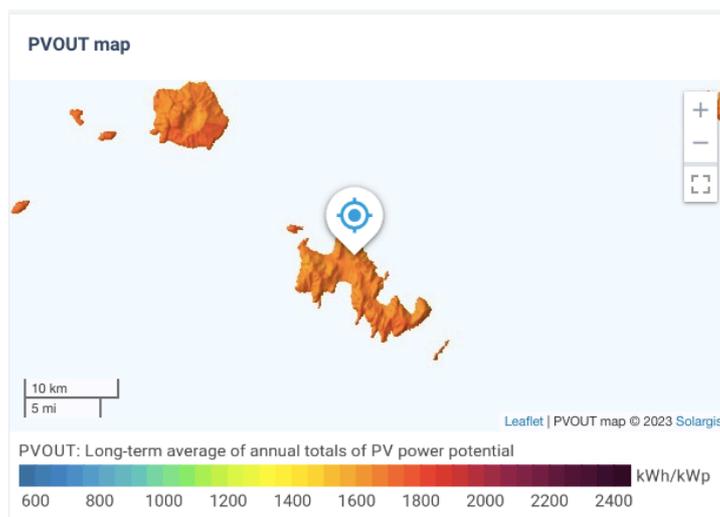


Figura 8: Potencial en energía solar de Tilos (Global Solar Atlas, 2023)

Por otra parte, dentro del 10% de la parte más ventosa de la isla, el potencial eólico medio es de 9,55 m/s, lo que implica un potencial de producción eléctrica con una turbina genérica de 3,45 MW - IEC Clase 2 de 949 W/m² (Global Wind Atlas, 2023).

Según un análisis detallado del viento citado en el documento de Kaldellis y Zafirakis (2020), es de calidad media, con una velocidad media anual de 6,5 m/s a una altura de 60 metros. Sin embargo, la isla posee un perfil de electricidad solar muy bueno, teniendo días soleados durante todo el año, lo que les proporciona un potencial de paneles horizontales de aproximadamente 1.750 kWh/m². Además, se destaca que la vegetación de la isla también es muy propicia para la instalación de paneles solares, ya que casi no existen problemas de sombreado.

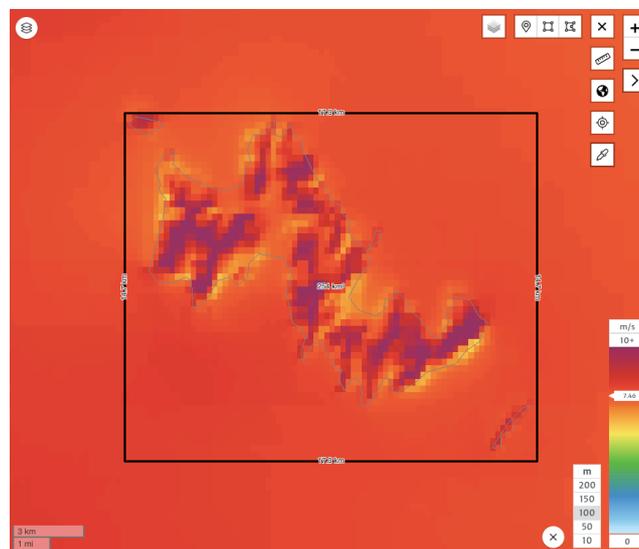


Figura 9: Potencial eólico de Tilos(Global Wind Atlas, 2023)

Tilos también es conocida por albergar una importante variedad de aves, incluidas especies raras de águilas que aprecian especialmente los acantilados secos de la isla. También es un ecosistema importante para las aves migratorias, que pasan por las islas en el curso de sus migraciones estacionales (Tilos, 2023).

Estos elementos deben tenerse en cuenta, ya que las infraestructuras energéticas implantadas en la isla fueron apoyadas por organizaciones que sí se preocupan por las externalidades de dichos proyectos sobre todos los factores medioambientales. Dado que las turbinas eólicas o los parques solares fotovoltaicos pueden perturbar un ecosistema, es algo que debe tenerse en cuenta a la hora de implantar un sistema energético totalmente renovable.

Planificación energética

En 2017 se inició el proyecto financiado por la Unión Europea S4S Tilos, que comenzó con la instalación de un aerogenerador de 55 metros de altura en la parte norte de la isla, apoyado por la investigación de la universidad griega West Attica de Psachna. El aerogenerador tiene una potencia nominal de 800 kW (Eunice, 2023). El proyecto también incluye la instalación de una estación de recarga de vehículos eléctricos. El aerogenerador es capaz de proporcionar tres cuartas partes de las necesidades de la isla en verano, y un excedente de energía en invierno (Hope, 2021). La turbina eólica cuenta con el apoyo de una granja de paneles solares a pequeña escala, situada en un valle cercano, formando en conjunto una central eléctrica híbrida. La unidad solar a pequeña escala está formada por 592 paneles fotovoltaicos con una potencia total de 160 kWp (Eunice, 2023).

Dadas las condiciones meteorológicas de la isla, la producción anual de los aerogeneradores es de 2,1 GWh, equivalente al 70% de la demanda anual de la isla. Asimismo, se espera que la producción fotovoltaica de la infraestructura de paneles solares produzca 280 MWh de electricidad, lo que equivale al 10% de la demanda anual de la isla (Kaldellis y Zafikaris, 2020). En el mismo documento se señala que la irradiación fotovoltaica es más predecible que la eólica, lo que permite una mejor regulación de la producción y ayuda a las infraestructuras de carga de baterías.

El proyecto, que se inició en los primeros meses de 2015 y se puso en marcha en enero de 2019, tiene un coste total de casi 14 millones de euros, de los cuales 11 millones fueron financiados por la Unión Europea (Comisión Europea, 2020).

El proyecto completo en la isla se compone de una turbina eólica, una unidad solar y un sistema de baterías de almacenamiento. El sistema de baterías posterior está pensado para dar cabida a 12 horas del consumo de la isla. La potencia nominal del sistema de baterías es de 800 kW, ligeramente inferior a la punta de la isla, que se ha calculado en 900 kW, de los cuales 650 kW proceden del pueblo de Livadia. Esta hecho por cubrir durante 12 horas la demanda de la isla sin necesidad de otras fuentes de energía (Kaldellis y Zafirakis, 2020).

El proyecto también incluía la instalación de un centenar de contadores inteligentes. Estos contadores inteligentes están pensados para conocer la demanda de determinados consumidores, ya sea un hogar o una estación de bombeo de agua, con el fin de suavizar el consumo a lo largo del tiempo y en función de la producción eléctrica de la infraestructura de energías renovables. Esto forma parte de la idea más amplia de proporcionar al cliente las herramientas adecuadas para controlar su consumo y supervisarlos a lo largo del tiempo. En conjunto, el sistema se apoya en un Sistema y Centro de Gestión Energética de Alto Nivel que está pensado para predecir los picos de demanda y adaptarse antes y

después de dichos picos para garantizar un suministro constante de electricidad en toda la isla a lo largo del tiempo (Kaldelis y Zafirakis, 2020).

Para hacer frente a la intermitencia de estas dos fuentes de energía renovable, la isla almacena el excedente de energía que pueda generarse durante el día o en las horas valle en dos baterías de alta densidad (Hope, 2021). Estas dos baterías tienen una producción energética nominal de 2,8 MWh juntas (Eunice, 2023). Las baterías son también una iniciativa de la Comisión Europea (2020) para probar nuevas tecnologías que proporcionen una autonomía ecológica a las pequeñas islas que dependen de sus propias microrredes. Las baterías a escala local que se están implantando son de sales fundidas.

Al estar aislada del continente, ya sea Turquía o Grecia, la isla tiene su propia microrred, como se ha definido anteriormente, que da servicio a los 100 hogares de la isla. La microrred está conectada por cable submarino a una central eléctrica diésel situada en la isla de Kos en caso de que se necesite electricidad adicional. La microrred inteligente de la isla está diseñada para comprender y explotar mejor tanto la producción como la demanda de energía en la isla, acomodando ambas de manera eficiente. Sin embargo, las frecuentes tormentas que azotan la zona suelen romper la conexión y, por tanto, provocar cortes de electricidad (Hope, 2021).

Tilos está conectada a la microrred Kos-Kalymnos, dos islas cercanas del mar Egeo donde funcionan centrales eléctricas diésel, a través de un cable submarino que pasa por la isla de Nisyros. Tilos, la última de la fila, sufría frecuentes cortes de electricidad debido al mal tiempo en la costa mediterránea. Por ello, en la isla hay un generador diésel de reserva por si hay que desconectarla de la red. Antes del proyecto TILOS, el generador de emergencia era manual, pero con la implantación de dicho proyecto se automatizó como parte de la automatización del sistema de gestión energética (Kaldelis y Zafirakis, 2020).

Los resultados del proyecto TILOS son que, si bien la infraestructura de FER cubre una media del 70% de la demanda energética de la isla, aún no se adapta a toda la demanda de la isla y se apoya en la microrred más amplia de las islas de Kos y Kalymnos. Además, se ha observado que el sistema inteligente aún no es totalmente eficiente, ya que en los picos de producción a menudo la energía se envía a la otra isla, en lugar de suavizar el consumo para otros usos dentro de la isla. Sin embargo, es importante señalar que, en primer lugar, el sistema de gestión se basa en tecnologías de aprendizaje automático e inteligencia artificial, que podrían mejorar a medida que se vaya acumulando información. En segundo lugar, el trabajo de Kaldellis y Zafirakis (2020) tiene ya tres años, y los

resultados publicados en otras fuentes son más convincentes hoy en día y alentadores para otras aplicaciones dentro de la Unión Europea.

El municipio recibe un 3% de los ingresos generados en la central eléctrica por parte de Eunice Energy Group, una empresa energética privada griega (Hope, 2021).

País aislado de escala mediana – Islandia

Panorámica del país

Islandia es un país del norte de Europa, situado entre el océano Atlántico norte y el océano Ártico. Se encuentra a 550 km al oeste de Groenlandia, a 800 km al sur de la isla principal del Reino Unido y a 1.000 km al este de Noruega. Es una isla de 385.000 habitantes que ocupa una superficie total de unos 100.000 km². Es la segunda isla más grande de Europa, por detrás de Gran Bretaña, y la 18ª del mundo. El país tiene su propia lengua, su propia moneda y se rige por una república constitucional parlamentaria. Aunque mantiene estrechas relaciones con la Unión Europea, participa en las conversaciones sobre el libre comercio europeo y estuvo a punto de ingresar en la Unión en el siglo XXI¹¹, el país no es Estado miembro de la Unión. No obstante, el país mantiene importantes relaciones y varios acuerdos con la Unión Europea, sobre todo en materia de seguro sanitario (Government of Iceland, 2023).

La capital del país es Reikiavik, situada en el extremo suroeste de la isla, en la costa, y con una población de 125.000 habitantes. Kópavogur (37.000), Hafnarfjörður (30.000), ambas en la región de la capital, Akureyri (18.000) y Reykjanesbær (18.000) son las otras ciudades importantes del país. Todas las ciudades y pueblos importantes están equipados con centros de salud y/u hospitales (Government of Iceland, 2023).



Figura 10: Mapa de Islandia (Capture Atlas, 2023)

11 En julio de 2009, Islandia presentó su candidatura a Estado miembro de la Unión Europea, presentada a Suecia. Finalmente, el país retiró su solicitud en 2015 (Le Monde, 2015).

El país está cubierto de glaciares, volcanes y fiordos. El país es especialmente conocido por sus actividades volcánicas, los géiseres, las termas naturales y su singularidad geológica. El punto más alto del país es la cima del Hvannadalshnjúkur, que culmina a 2.110 m sobre el nivel del mar. Rodeando el perímetro insular, la carretera 1 es el principal medio de transporte de la isla, con 1.300 km de longitud, que también conecta las principales ciudades. Se puede acceder a la isla en ferry saliendo de Dinamarca y pasando por las Islas Feroe, así como en transporte aéreo a través de su aeropuerto internacional situado en los alrededores de la capital.

Los principales recursos del país son la energía hidroeléctrica, el potencial pesquero y la energía geotérmica. Islandia ha observado un crecimiento económico constante en los últimos años, impulsado por los crecientes ingresos generados por el turismo. Tras la crisis de Covid, la economía del país, como otras, experimentó un crecimiento del 7% en 2020, antes de recuperar más de 4% el año siguiente. Sin embargo, el país viene observando una inflación persistente en el último año, que llegará al 7% en 2022. Es una gran preocupación para el país, ya que tiene un objetivo de inflación del 2,5% (OCDE, 2023^a) (US International Trade Administration, 2023).

El principal socio comercial del país es EE.UU. como país, en parte debido al importante número de ciudadanos estadounidenses que visitan Islandia por turismo, mientras que el mayor socio comercial en conjunto es la Unión Europea. Las exportaciones islandesas están dominadas por productos manufacturados, sobre todo aluminio, productos marinos y bienes y servicios relacionados con el turismo. Por otro lado, las importaciones están dominadas por bienes de consumo, equipos de transporte, alimentos y bebidas y combustibles y lubricantes (US International Trade Administration, 2023). En conjunto, en 2022 el Producto Interior Bruto (PIB) del país está dominado por las actividades manufactureras (11,5%), las actividades inmobiliarias (10,5%) y la venta al por mayor, comercio y venta al por menor de vehículos de motor (9,6%). La agricultura, la silvicultura y la pesca representan el 4,5% del PIB del país, mientras que el sector sanitario representa el 9,1% del PIB (Statistics Iceland, 2023).

En 2023, tenía el 112º PIB del mundo, pero el 8º PIB per cápita del mundo, con un PIB per cápita de 75,18 mil dólares y la 172ª población mundial. En cuanto a la región europea, tiene el 32º PIB, el 5º PIB per cápita y la 38ª población (IFM, 2023^a). Además, el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo deriva un indicador, llamado Índice de Desarrollo Humano¹², utilizado para clasificar los

12 El Índice de Desarrollo Humano es un índice en una escala de 0 a 1 que clasifica a los países a través de tres factores, su PIB per cápita en dólares, la esperanza de vida en el momento de nacer y el nivel de educación de los ciudadanos de 17 años o más.

países según su desarrollo en una escala de 0 a 1. En ese ranking, Islandia ocupa el 3º lugar mundial, detrás de Suiza y Noruega (United Nations Development Program, 2023).

Islandia es un país que presenta unas características geográficas únicas, al estar situado lejos de los continentes europeo y americano, en el océano Atlántico. Su situación septentrional también crea una importante estacionalidad en el país, con días extremadamente cortos en invierno e inversamente en verano. Además, la isla está situada justo en la unión de la placa tectónica norteamericana y la placa euroasiática. Estos últimos aspectos generan importantes actividades sísmicas, volcánicas y, en general, geotérmicas en el país, como se explica en la sección siguiente. En consecuencia, la principal fuente potencial de energía renovable es el calor subterráneo de la isla, frente al potencial eólico o solar.

Potencial en energías renovables

Como fuente de energía renovable de alto potencial, la energía geotérmica es objeto de importantes búsquedas sobre su desarrollo. Con el fin de identificar mejor las zonas aptas para este tipo de infraestructuras, tanto el Instituto de Ciencias de la Información como el Instituto de Geociencias y Georrecursos crearon un mapa mundial del potencial geotérmico para la implantación altamente eficiente de centrales geotérmicas (Richter, 2020). El objetivo de este trabajo es proporcionar un mapa que localice los lugares adecuados para una central de energía geotérmica eficiente, basándose en datos geoespaciales y en pruebas empíricas. El mapa mencionado está disponible a continuación:

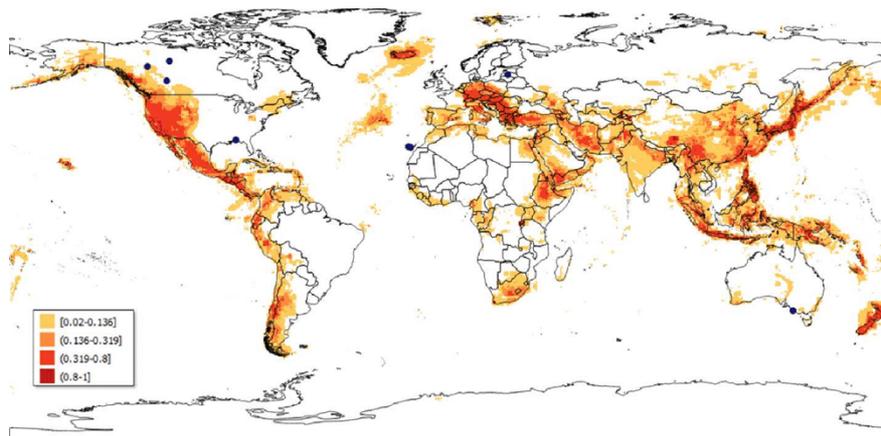


Figura 11: Idoneidad geográfica de las centrales geotérmicas eficientes (Coro and Trumpy p8, 2020)

En el gráfico anterior, los colores más cálidos en los tonos rojos indican una mayor puntuación de idoneidad siguiendo la clasificación establecida en el documento de Coro y Trumpy, en el que se

detallan los trabajos del Instituto de Ciencias de la Información y del Instituto de Geociencias y Georrecursos (2020). Los puntos indican la ubicación de las centrales geotérmicas utilizadas para evaluar la precisión del modelo. Como podemos ver en el mapa anterior, Islandia se encuentra en una zona especialmente roja, lo que pone de manifiesto su ubicación altamente adecuada y eficaz para la energía geotérmica.

Siguiendo el método utilizado en la sección anterior dedicada a la isla de Tilos, no hemos podido determinar un potencial fotovoltaico medio para el país a través de los recursos proporcionados por el sitio web Global Solar Atlas (2023). En efecto, esta herramienta no estudia la parte más septentrional del planeta, debido a sus particulares condiciones de luz diurna, al tener un solsticio de invierno de menos de 3 horas de luz diurna en diciembre frente al de verano de más de 20 horas de luz diurna. Además, las regiones más septentrionales estudiadas por la herramienta presentan un potencial de energía fotovoltaica muy limitado, lo que explica que Islandia no esté incluida en la herramienta Atlas Solar Global. En consecuencia, Islandia presenta una perspectiva fotovoltaica limitada, con aplicaciones potenciales sólo útiles en época estival.

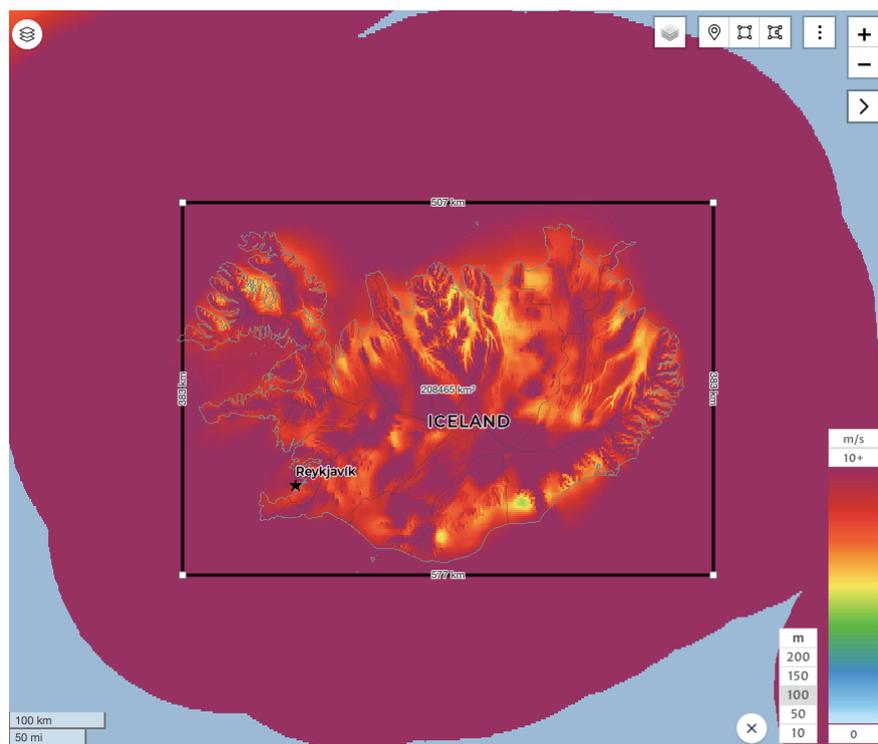


Figura 12: Potencial eólico de Islandia continental y costas cercanas (Global Wind Atlas, 2023)

Por otro lado, dentro del 10% de la zona más ventosa dentro y fuera de la isla, la velocidad media del viento en altura es de 11,5 m/s, lo que implica una producción eléctrica potencial para el mismo aerogenerador utilizado como heurístico en la sección dedicada a la isla de Tilos de 2084 W/m². Esto representa un potencial muy fuerte, ya que se encuentra en la escala más alta de la herramienta atlas

para la producción de energía eólica. En consecuencia, Islandia posee un potencial eólico muy importante, como puede verse en la figura siguiente, en la que las zonas de color morado más oscuro representan zonas de alto potencial (Global Wind Atlas, 2023).

Planificación energética

Como resultado, la herramienta proporciona diversa información sobre los usos y las fuentes de energía del país. La siguiente figura presenta el desglose de la energía según las distintas fuentes, en Tera Joules.

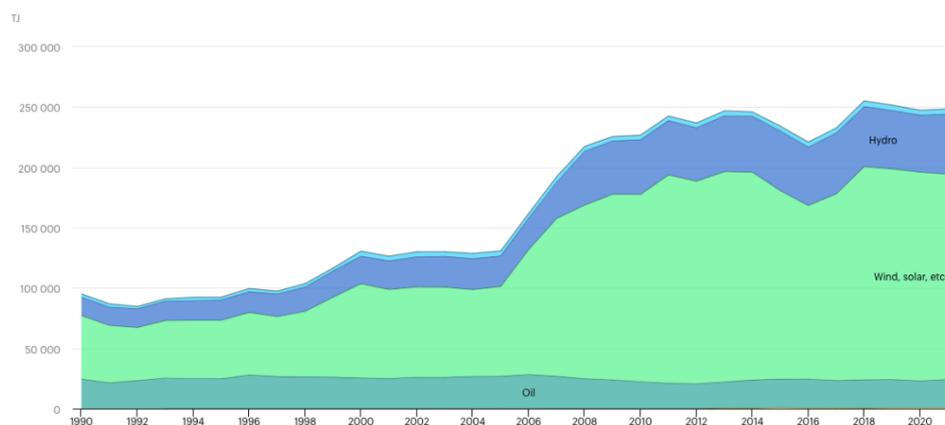


Figura 13: Suministro de energía en Islandia a partir de 1990 hasta 2021 (IEA, 2023)

En la tabla anterior, la línea azul superior corresponde a la producción de energía a partir del carbón. Como podemos ver, la producción energética de Islandia está dominada mayoritariamente por las fuentes renovables, siendo la zona verde las fuentes de energía renovables comunes (eólica, solar o geotérmica) y la energía hidráulica. Profundizando en los datos proporcionados por la Agencia Internacional de la Energía, podemos ver que la mencionada zona verde de la tabla anterior corresponde a la energía geotérmica producida para fines de electricidad y calor. Las energías renovables eólica o solar representan una parte muy pequeña de la producción energética del país. Sin embargo, también observamos que Islandia no ha alcanzado el cero neto en cuanto a producción energética, ya que sigue teniendo una pequeña cuota de fuentes de energía fósiles, con el carbón y el petróleo representando casi el 20% de la energía consumida en el país. También es importante señalar que tanto el carbón como el petróleo se importan al país. El carbón se utiliza exclusivamente para la industria, que representa la mayor área de consumo energético del país, mientras que el petróleo se utiliza principalmente para el transporte (cerca del 50%) y la pesca (casi el 30%) y el resto para la industria, el sector residencial, la silvicultura y otros usos auxiliares (IEA, 2023).

En 1997, Islandia puso en marcha una iniciativa gubernamental de desarrollo sostenible, con un plan energético a largo plazo que abarcaba consideraciones económicas, sociales y medioambientales. Como resultado de esa iniciativa se redactó el Plan Marco, que suponía la implantación y desarrollo de 41 infraestructuras de energías renovables, con 19 centrales hidroeléctricas y 22 de energía geotérmica que se desplegarían en la isla y se probarían entre 1999 y 2003. El proyecto dio lugar a la implantación generalizada de infraestructuras de energía hidroeléctrica y geotérmica en el país (Thórhallsdóttir, 2007). Esto explica en última instancia la temprana importancia de las energías renovables en la combinación energética de Islandia, que permiten al país adquirir cierta soberanía sobre su producción energética.

En 2007, el país puso en marcha una Estrategia de Cambio Climático para hacer frente tanto a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático de 1992¹³ como al Protocolo de Kioto de 1997¹⁴, en vigor de 2005 a 2020. La estrategia se divide en función de los distintos sectores responsables de una elevada proporción de emisiones de GEI. En aras de la simplicidad, se fijara únicamente en las iniciativas relacionadas con la energía, excluyendo por tanto las partes relacionadas con los procesos industriales, la agricultura o los residuos. Islandia cuenta con una estructura de producción de energía bien establecida, centrada en la energía geotérmica y la energía hidroeléctrica, por lo que este documento se centra principalmente en la descarbonización del transporte y la pesca. Las iniciativas resultantes se centran en la inversión en "vehículos de motor respetuosos con el clima", que utilizarían biocombustibles o electricidad producida a través de sus capacidades de energía renovable y evitarían el uso de carbón o petróleo para alimentar sus medios de transporte y pesca. Por otro lado, la estrategia también menciona algunas inversiones para la mejora de las infraestructuras de energía geotérmica instaladas, que tienen emisiones de carbono inmensamente inferiores a las de los combustibles fósiles, con proyectos en curso para plantas de energía geotérmica libres de carbono (Ministry of Environment, 2007).

Hasta ahora, Islandia siempre ha sido pionera en energías renovables con sus infraestructuras geotérmicas e hidroeléctricas. Sin embargo, sigue contribuyendo a las emisiones globales, a través de

13 También llamado acuerdo de Río de 1992, ratificado ese mismo año en Nueva York, este convenio reconoce el impacto humano en el aumento vertiginoso de los GEI y hace un llamamiento a la cooperación mundial para responder al consiguiente problema medioambiental. El tratado ha sido firmado por 154 países, entre ellos Islandia (Naciones Unidas, 1992).

14 Basado en el consenso de 1992 de que las emisiones de GEI están aumentando debido a la acción humana, el protocolo se establece para una colaboración global para reducir las emisiones de GEI. El tratado ha sido firmado por 84 países, entre los que también se encuentra Islandia (Naciones Unidas, 1997).

su consumo de carbón y petróleo para fines industriales y de transporte. Por ello, el país publicó en septiembre de 2020 un plan de energía sostenible para el periodo que finaliza en 2050. Esta iniciativa establece los pasos a dar para alcanzar la neutralidad de carbono en la producción y consumo de energía. Supone, por tanto, la sustitución de los combustibles fósiles utilizados en el transporte por energías renovables, lo que implicaría la incorporación de infraestructuras geotérmicas e hidroeléctricas, así como disponer de nuevas opciones energéticas diversas. Para apoyar este cambio a un sistema totalmente alimentado por energías renovables, el plan implica los sistemas de energía inteligentes y flexibles, que permitirían hacer coincidir de manera más eficiente la demanda de suministro de energía, y las operaciones de las infraestructuras actuales y por crear (Ministerio de Industria e Innovación, 2020).

Además, en Islandia, la red eléctrica no está conectada a ninguna otra red. La red eléctrica es propiedad en su totalidad de Landsnet, una empresa pública, encargada de la transmisión y distribución de electricidad en toda la isla (Orkustofnun, 2023). Al ser una isla situada lejos de los continentes y de otras islas importantes, el país gestiona su propia red eléctrica y no depende ni depende de ningún otro proveedor eléctrico. Como resultado, es completamente autónomo en sus elecciones y decisiones eléctricas.

País de escala más grande – Costa Rica

Panorámica del país

Costa Rica está situada en América Central, entre Panamá y Nicaragua en sus fronteras norte y sur, y el Océano Pacífico y el Caribe en sus límites este y oeste. Entendemos por Centroamérica todos los países situados entre el norte del continente americano, a partir de Estados Unidos, y el continente sudamericano a partir de Colombia. Incluye también las islas situadas en el océano Caribe.

En 2023 Costa Rica tiene 5,28 millones de habitantes, y un PIB de 77.000 millones de USD, es la 5ª economía de Centroamérica y la 79ª del mundo en PIB, según el FMI. El PIB per cápita del país es de 14,73 mil dólares, 62º en el mundo y 7º en la región centroamericana. Tiene la 120ª mayor población del mundo, y la 9ª de su región (IFM, 2023ª). Además, ocupa el puesto 58 en el Índice de Desarrollo Humano global, siendo Centroamérica el 3er país en este ranking (United Nations Development Program, 2023).

Costa Rica es una república democrática que en 1948 decidió no tener ejército. Con esa decisión, el país decidió centrarse más en el gasto en educación, sanidad y protección del medio ambiente. Además, gracias a un sistema educativo eficiente, el país se beneficia de un sistema educativo eficiente, que permite presentar una población bien educada, lo que lo convierte en un destino atractivo para las inversiones extranjeras.

La capital del país es San José, situada en el centro del país, con más de 300 000 habitantes. Las otras dos ciudades principales, Alajuela y Cartago, ambas con más de 100 000 habitantes, se encuentran en los alrededores de la capital. Con un clima tropical, una parte importante de su territorio protegido como parques naturales y lugares costeros ideales, el país se ha volcado en el desarrollo del turismo. Como resultado, los otros polos principales del país son las zonas turísticas de Guanacaste, en la isla del Pacífico, y la costa caribeña. Todas las principales ciudades y centros turísticos están equipados con centros de salud y/u hospitales.



Figura 14: Mapa de Costa Rica (Nations Online, 2023)

Situado en América Central, el país se beneficia de un clima tropical con una importante selva tropical y biodiversidad. Por otro lado, el centro del país alberga la continuación de la Cordillera Americana, con cadenas volcánicas y montañosas que atraviesan el país, haciendo que la mayoría de sus ciudades centrales se sitúen entre los 900m y los 1.800m sobre el nivel del mar. El Cerro Chirripó es el lugar más alto del país, a 3.820 m sobre el nivel del mar. De sus más de 200 volcanes, 5 siguen activos. Además, el país está sometido a importantes actividades sísmicas.

Después de una importante recuperación tras el bajón de la crisis de Covid que generó un crecimiento económico negativo para Costa Rica, éste se ralentizó, aunque sigue siendo prometedor, con unas previsiones del 2,3% y 3,7% para 2023 y 2024 respectivamente. El crecimiento económico debido a una desaceleración del consumo causada por el aumento de la inflación, generada por factores externos, en particular la guerra Ucrania-Rusia. Esto ha sido posible gracias a la recuperación de sus exportaciones, por encima de la media de la OCDE o de otros centros económicos latinoamericanos como México o Chile. Aunque el país se beneficia de una esperanza de vida en línea con la media de la

OCDE15 y de un contexto político estable, sigue sufriendo una elevada tasa de desempleo y actividades de economía paralela (OCDE, 2023^b).

La actividad económica de Costa Rica se centra principalmente en los servicios (72,8% del PIB de 2021), que están impulsados por el importante turismo del país. A continuación, las actividades industriales suponen el 22,4% del PIB de 2012, mientras que la agricultura representa el 4,8%. Por otra parte, como se indica en el cuadro del anexo B, las exportaciones están bien diversificadas y están dominadas por los equipos médicos, los productos agrícolas y los componentes eléctricos. Los principales productos agrícolas exportados son las frutas, el plátano y la piña representan el 7% de las exportaciones del país, y el café, siendo Costa Rica uno de los principales productores de café (OCDE, 2023^b).

Estados Unidos es el principal socio comercial de Costa Rica, representando el 43% de sus exportaciones, y la Unión Europea, con Países Bajos (8%) y Bélgica (5%) como principales socios comerciales europeos. Por último, sus vecinos centroamericanos representan una parte importante de sus exportaciones (19%) (OCDE, 2023^b). La parte dominante de las exportaciones destinadas a Estados Unidos se debe a la importante presencia de empresas estadounidenses en Costa Rica. En efecto, Intel o Hewlett Packard para la electrónica, y Procter and Gamble o Boston Scientific para los productos médicos (King, 2018).

Potencial en energías renovables

Como podemos ver en la figura 11, Costa Rica, con su ubicación centroamericana, presenta un prometedor potencial de energía geotérmica, estando situada en la zona roja del mapa mencionado. Esto se debe a las importantes actividades volcánicas y sísmicas de la zona, explicadas por la ubicación del país, entre las placas Coco y Caribe. Como resultado, Costa Rica es un lugar muy adecuado para la implantación de centrales geotérmicas para la producción de energía renovable y baja en carbono.

En cuanto al potencial de energía solar, al igual que para las demás regiones estudiadas, hemos podido determinar el potencial fotovoltaico de Costa Rica mediante la herramienta Global Solar Atlas (2023). En conjunto, el país ofrece una IDN anual desde 584 kWh/m², en sus zonas de menor potencial, hasta 1 900 kWh/m² en las zonas más prometedoras del país. En consecuencia, y como podemos ver en el

15 Por economía paralela entendemos la actividad económica que no está vigilada y controlada por el Estado, siendo todas las transacciones ilegales o pagadas en efectivo y en adelante no declaradas a las autoridades financieras.

siguiente mapa que resume el potencial para el total de la región, el potencial fotovoltaico del país es limitado, siendo interesante únicamente en un número limitado de zonas para el país, su costa pacífica.



Figura 15: Potencial en energía solar de Costa Rica (Global Solar Atlas, 2023)

Por otro lado, dentro del 10% de las regiones más ventosas del país, la velocidad media del viento es de 8,75 m/s, lo que implica un potencial de producción eléctrica para el mismo aerogenerador, instalado a una altura de 100 metros sobre el terreno, utilizado como heurística en las secciones equivalentes por Tilos y Islandia de 966 W/m². Siguiendo el rango proporcionado por la herramienta, podemos ver que este potencial es interesante y puede ser una importante fuente de energía para el país. Además, como podemos ver en la siguiente figura, las zonas eólicas prometedoras se encuentran cerca de la capital del país, que también representa el principal centro económico, y como tal origina la mayor parte de la demanda energética. Además, podemos observar que las regiones más adecuadas para la implantación de infraestructuras de energía eólica se encuentran más en el interior que en alta mar, lo que facilita la implantación de aerogeneradores (Global Wind Atlas, 2023).

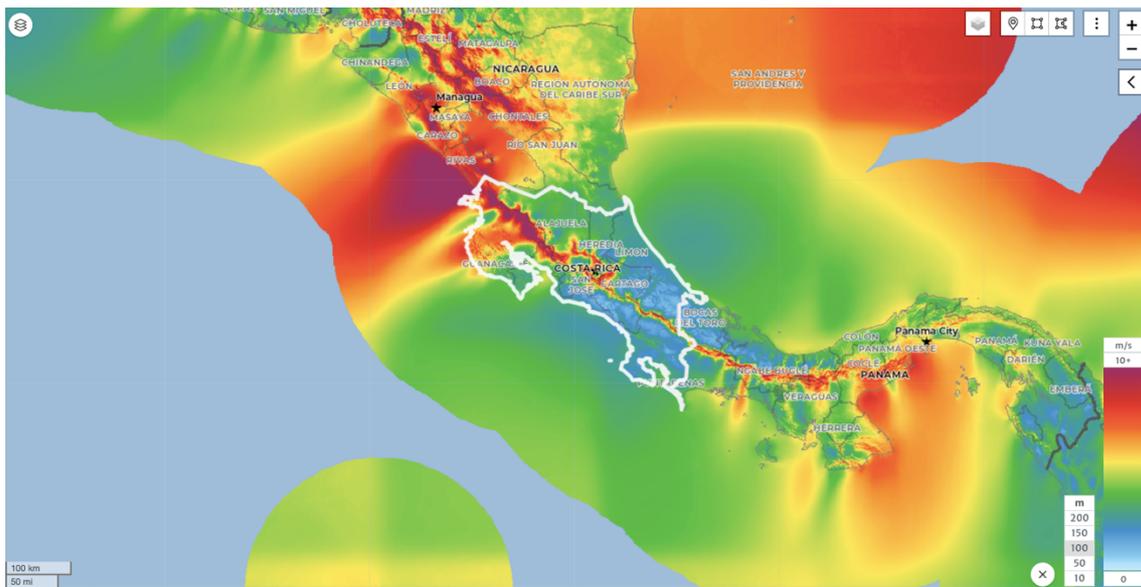


Figura 16: Potencial de energía eólica de Costa Rica (Global Wind Atlas, 2023)

Planificación energética

Recurriendo de nuevo a la base de datos de la IEA para acceder a la información relacionada con la producción de energía en Costa Rica, podemos ver en la siguiente figura el suministro total de energía en Costa Rica para el periodo 1990-2021.

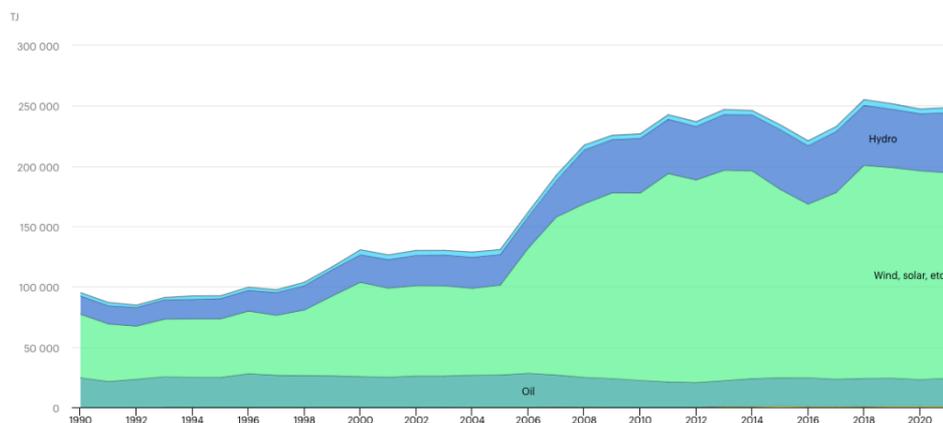


Figura 17: suministro de energía de Costa Rica de 1990 a 2021 (IEA, 2023)

En el gráfico anterior podemos ver que la producción energética de Costa Rica depende en gran medida del petróleo, que representa más del 50% del suministro energético del país en tera julios. El resto de la energía suministrada procede de fuentes de energía renovables, como la eólica o la solar, la hidroeléctrica o los biocombustibles y residuos. El país no depende de otros combustibles fósiles, como el carbón o el gas natural, aparte del petróleo. Sin embargo, al observar a través de la misma

herramienta la producción de electricidad del país, podemos ver que ahora está completamente libre de energías fósiles, dependiendo en gran medida de la energía hidroeléctrica (más del 70% de la producción de electricidad), la energía geotérmica y la energía eólica, con ligeras instalaciones fotovoltaicas y uso de biocombustibles. A su vez, esta electricidad se consume en gran medida para uso residencial, antes que para servicios comerciales y públicos y usos industriales. La importante cuota del petróleo en la producción de energía se debe a la gran demanda de ese combustible fósil para el transporte, casi el 80% de su consumo final, mientras que la industria sólo supone cerca del 15% del consumo. En general, como puede verse en el anexo C, en Costa Rica la energía se utiliza principalmente para el transporte, casi el 50% del consumo energético, mientras que la actividad industrial asciende a más del 20% y los usos residencial y comercial a casi el 10% cada uno. Es importante señalar que casi la totalidad de los productos petrolíferos consumidos se importan de países extranjeros (IEA, 2023).

Como resultado, observamos que Costa Rica es altamente dependiente del petróleo debido a sus importantes necesidades energéticas para el transporte, que valora los usos de los derivados del petróleo por su característica de alta densidad energética. Esto podría explicarse por la importante dependencia de la economía del turismo, que requiere ofrecer servicios de transporte dentro del país. Por otro lado, las actividades industriales son limitadas, no superando notablemente los usos residenciales o comerciales. También es importante señalar que toda la producción eléctrica se genera a través de energías renovables. Ahora es cuestión de que el país determine cómo pasar de los productos derivados del petróleo a la electricidad para el transporte y las actividades industriales que aún utilizan petróleo.

En Costa Rica, la producción de energía está controlada por el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), que posee una posición monopolística sobre la capacidad de generación y es responsable del 85% de la producción energética del país. Esta fuerte posición de la empresa pública, combinada con las estrictas restricciones y regulaciones vigentes en el mercado energético de Costa Rica, contribuye a que el mercado energético nacional sea estable y esté muy controlado (European Union, 2021).

Creado en 1949, el ICE permitió a Costa Rica desarrollar su sistema de producción de electricidad independiente y casi totalmente renovable. Antes, la electricidad era suministrada por multinacionales estadounidenses que prestaban servicios eléctricos deficientes. La ambición era tener un proyecto a largo plazo de producción eléctrica en el país, con una distribución equitativa en todo el territorio. Desde el principio, en 1949, el país ya apuntaba a las fuentes de energía renovables, obligando al ICE a explotar el potencial hidroeléctrico del país, salvaguardando al mismo tiempo sus paisajes y su biodiversidad. En 1953, el país protegió algunos ríos de la contaminación y otros factores para darles

prioridad en la producción hidroeléctrica. Además, en 1976, el Estado instó al ICE a explorar el potencial geotérmico del país, y en 1980 el potencial eólico con estudios de idoneidad. Como resultado, el país pudo alcanzar un sistema eléctrico casi totalmente renovable en 2022, con un 98,6% de su producción de electricidad procedente de fuentes de energía renovables (Wilde-Ramsing y Potter, 2006).

Por lo tanto, a través de una industria nacional de la energía estricta y muy controlada, controlada por un único actor, Costa Rica fue capaz de lograr una producción eléctrica casi totalmente renovable. Sin embargo, como se ha visto anteriormente, el país sigue teniendo importantes emisiones de carbono debido a su consumo de petróleo para el transporte principalmente. Por ello, el país desarrolló un Plan Nacional de Descarbonización para el periodo 2018 - 2050. Este plan se centra principalmente en la mejora del transporte, el transporte de mercancías y las prácticas industriales con el fin de pasar a sistemas libres de carbono. Esto implica, por ejemplo, en el sector del transporte, pasar a los biocombustibles y a los vehículos eléctricos. Por lo tanto, el plan también implica una consolidación y ampliación del sistema eléctrico. En cuanto a la consolidación, el plan subraya la necesidad de que los precios de la electricidad generada a partir de fuentes renovables sean competitivos con los de una fuente con más componente de carbono, como el carbón. Esto se consigue también mejorando la eficiencia a lo largo de todo el sistema eléctrico, con sistemas eficientes de gestión de la energía y capacidad de recopilación de datos para poder suavizar y ajustar mejor la producción y la demanda de energía. Por otro lado, el escalamiento de la infraestructura de producción se plantea a través de diversos recursos, y contar con la capacidad de producción suficiente para atender el aumento de la demanda provocado por la electrificación y digitalización de la economía (Gobierno de Costa Rica, 2018).

Resumen del primer Capítulo

Como resultado, hemos visto tres zonas de diferente escala de población y demanda energética que recurren en gran medida a las energías renovables. Cada una con su fuente de energía renovable dominante, Tílos – eólica-, Islandia – geotérmica- y Costa Rica – hidroeléctrica-, y con distinto grado de diversificación fueron capaces de alcanzar un alto grado de producción de electricidad renovable, lo que les otorgó un alto grado de control sobre sus sistemas energéticos. También hemos observado que las tres zonas tenían recursos y características diferentes que les hacían depender de distintas fuentes de energías renovables. También es importante señalar que la producción de energía renovable en Costa Rica e Islandia es el resultado de un largo proceso y que aún quedan progresos por hacer en lo que respecta a la energía consumida para el transporte.

VENTAJAS Y DESAFÍOS DE LA APLICABILIDAD DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES EN UNA GRAN ESCALA

Costos

En el transcurso de esta parte sobre los costos de la energía, se usó la medida LCOE como detallado en la parte de metodología presente en la introducción. Aunque el LCOE puede utilizarse para todo tipo de aplicaciones energéticas, lo más habitual es utilizarlo para comparar los costes de las fuentes de energía para la producción de electricidad. Por ese motivo, a veces se denomina Coste Nivelado de la Electricidad. Los análisis que se presentan a continuación corresponden a la producción de electricidad. Aunque proporcionan una buena visión de los costes de las distintas infraestructuras energéticas, es importante entender que sólo tiene en cuenta las aplicaciones de la electricidad, limitadas por tanto al transporte o a algunos usos industriales.

La empresa Lazard, asesora financiera global, elabora un informe anual sobre el coste nivelado de la energía para las distintas tecnologías del mercado. En el informe se han recopilado datos centrados en Estados Unidos y, por tanto, todas las hipótesis correspondientes se hacen de forma adecuada para el mercado estadounidense. La producción eléctrica estadounidense está diversificada, aunque en la actualidad sigue dominada por el gas natural (casi el 40%), el carbón y la energía nuclear, que representan casi el 20% de la producción eléctrica cada uno (IEA, 2023). En el anexo D figura un cuadro detallado de la producción de electricidad en EE.UU. para contextualizar mejor el análisis de Lazard. Sin embargo, esta información puede ser útil para dicho estudio, ya que proporciona un rango de LCOE para diversas fuentes de energía. Para una mejor comparabilidad, la tabla siguiente presenta los valores de LCOE sin subvenciones, ya que las energías renovables suelen estar sujetas a subvenciones que varían de un país a otro.

El cálculo del LCOE en esa investigación se ha realizado simulando la creación de una central eléctrica para cada una de las energías estudiadas, siendo el factor de descuento del proyecto la TIR del coste de los fondos propios del proyecto, suponiendo que el proyecto se financiara en un 60% con un coste de la deuda del 8%¹⁶. Después de lo cual, Lazard dibujó diferentes supuestos para cada tecnología

¹⁶ Las financiaciones de este tipo se realizan a través de préstamos y créditos; proporcionados bien por empresas, bancos, gobiernos o inversores privados; constituyendo lo que se denomina la parte de deuda y el capital propio, que corresponde al capital aportado por los accionistas de la empresa. El coste de los fondos propios es, por tanto, la rentabilidad mínima que los inversores privados exigirían por dicha

para derivar un escenario de caso bajo y alto, y no parece que este análisis incluyera ningún desmantelamiento ni valor residual de la planta en el cálculo (Lazard, 2023).

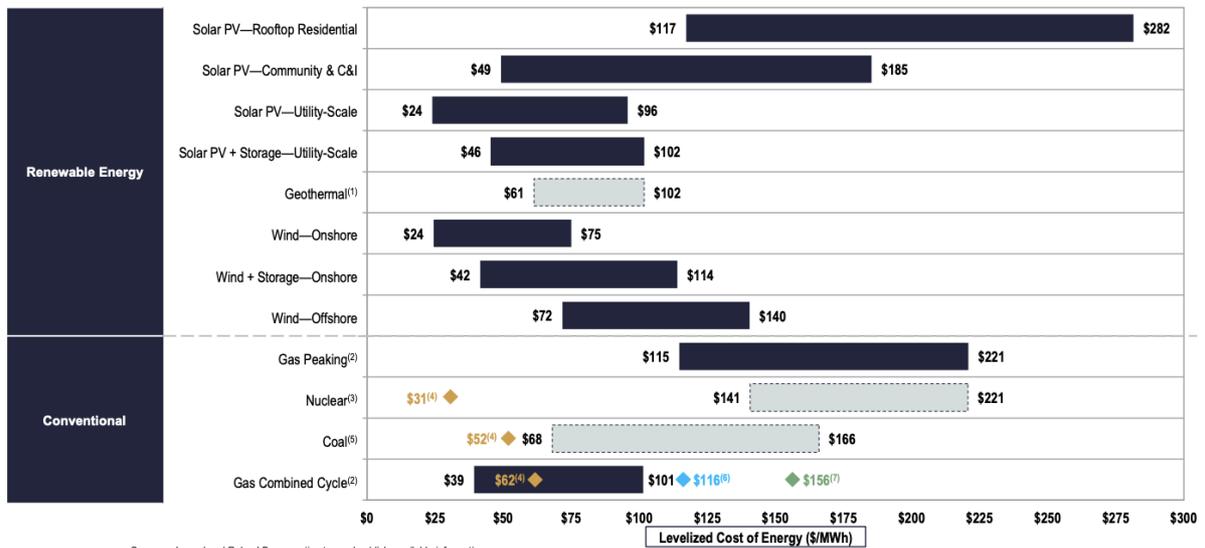


Figura 18: LCOE en 2023 de las diferentes fuentes de energía (Lazard, 2023)

En el cuadro anterior, los rombos diversos en los rangos corresponden a los escenarios específicos realizados en instancias particulares. Por otra parte, los recuadros sombreados en gris corresponden a casos en los que no se disponía de suficiente información pública, por lo que los valores son valores ajustados a la inflación de la versión anterior del informe.

De lo anterior se desprende que en Estados Unidos las energías renovables, en particular la "Solar - Utility scale"¹⁷, la Geotérmica y la Eólica "Onshore", son competitivas con las fuentes de energías convencionales y fósiles, incluidos el gas y el carbón. Sin embargo, hay casos claros en los que las energías fósiles son más competitivas, como los ciclos combinados de carbón y gas, ya que sus centrales pueden alimentar una importante producción eléctrica que compensa los costes iniciales de construcción.

Alternativamente, la Agencia Internacional de la Energía, como se ha visto en la sección anterior, también proporciona valores de LCOE para los diferentes recursos energéticos, así como para varias

inversión. Se calcula con la TIR, que significa Tasa Interna de Rendimiento, y corresponde a la tasa de descuento que hace que los inversores alcancen el punto de equilibrio, lo que significa que los rendimientos descontados son iguales al capital invertido.

¹⁷ Aquí nos interesa la energía solar a escala de servicios públicos, ya que corresponde a los programas fotovoltaicos a gran escala que pueden ampliarse para obtener mayores suministros energéticos, en contraposición a las aplicaciones fotovoltaicas domésticas privadas.

regiones (2022). Para estos cálculos, la IEA utilizó una escala temporal diferente para las infraestructuras solares fotovoltaicas y eólicas, con un intervalo de 25 años, mientras que Lazard utilizó 20 años para los proyectos eólicos y 30 para los solares a escala comercial. La IEA también utilizó distintos factores de descuento, utilizando un enfoque WACC18, con un 3-6% para la energía solar fotovoltaica y la eólica terrestre, un 4-7% para la eólica marina y un 7-8% para las infraestructuras nucleares, de carbón y de gas. Esto representa valores muy inferiores a los del análisis de Lazard. Además, los LCOE nucleares se calculan como si se estuviera creando un nuevo reactor nuclear, en lugar de una central nuclear completa. Los datos de la siguiente tabla se han extraído del informe mencionado, utilizando el escenario de las políticas declaradas por considerarse el más cercano a los valores reales y al contexto¹⁹.

	Coste de Capital (\$/kW)	Factor de Capacidad (%)	Combustible, CO ₂ , O&M (\$/MWh)	LCOE (\$/MWh)
Estados Unidos				
Nuclear	5 000	90	30	105
Carbón	2 100	35	25	95
Gas	1 000	55	35	60
Solar PV	1 090	21	10	50
Eólico "Onshore"	1 380	42	10	35
Eólico "Offshore"	4 040	42	35	120
Unión Europea				
Nuclear	6 600	80	35	140
Carbón	2 000	40	115	180
Gas	1 000	20	100	155
Solar PV	810	14	10	50
Eólico "Onshore"	1 590	29	15	55
Eólico "Offshore"	3 040	51	15	60

¹⁸ Coste medio ponderado del capital, corresponde al coste medio ponderado del capital de la deuda y de los fondos propios de una empresa.

¹⁹ Definición del escenario disponible en la nota al pie 32, los datos son fuente página 469 del informe (IEA, 2022).

China

Nuclear	2 800	80	25	65
Carbón	800	60	60	75
Gas	560	35	95	115
Solar PV	630	17	10	35
Eólico "Onshore"	1 160	26	15	45
Eólico "Offshore"	2 860	33	25	100

India

Nuclear	2 800	75	30	75
Carbón	1 200	65	40	60
Gas	700	40	75	95
Solar PV	590	20	5	35
Eólico "Onshore"	930	26	10	45
Eólico "Offshore"	2 780	33	25	120

Figura 19: 2021 análisis de LCOE (IEA, 2022)

En la tabla anterior, por CO₂ se entienden los costes de emisión de CO₂ en los países donde se aplica dicho impuesto, Combustible describe los costes del combustible y otros insumos para las operaciones en curso, O&M corresponde a Operaciones y Mantenimiento, Costes de Capital corresponde al coste de construcción real de la planta y, por último, Factor de Capacidad describe la producción media en relación con la capacidad máxima, es decir, la producción máxima de la instalación.

Podemos ver en la tabla anterior que, a pesar del bajo factor de capacidad de las energías renovables, casi dos veces inferior al de las energías fósiles y nucleares, ofrecen una mejor en todas las regiones, excepto en el caso de la energía eólica marina. Esto puede explicarse por sus costes de funcionamiento mucho más bajos y sus menores necesidades de capital en el momento de la implantación.

Aunque la cifra no coincide, los resultados de los dos análisis del LCOE son coherentes. Observamos que las energías renovables son muy competitivas frente a los combustibles fósiles y las energías nucleares, incluso cuando no se tienen en cuenta las subvenciones en el análisis de Lazard. Vemos un claro interés por cambiar a sistemas de energía eólica terrestre o solar fotovoltaica a gran escala.

Además, se ha visto en la parte de metodología del informe de Lazard que la heurística de esperanza de vida más alta para las centrales eléctricas es para las nucleares y las de carbón, que se cree que están activas durante unos 40 años, mientras que las de gas (20 años) o las solares y fotovoltaicas (de 20 a 30 años) duran menos. En consecuencia, dado que las infraestructuras nucleares y de carbón están envejeciendo (Gaudiaut, 2022), lo que significa que se avecinan decisiones importantes sobre la combinación energética y que, con unos LCOE competitivos, cabe esperar que las energías renovables obtengan una mayor cuota de la combinación energética.

Sin embargo, es importante tener en cuenta que el coste no es la única consideración a la hora de decidir poner en marcha un proyecto energético, sino también la cantidad de energía suministrada. Por ejemplo, un reactor nuclear, que forma parte de una central nuclear, tiene una potencia nominal que oscila entre 900 MW y 1 450 MW (MTECT, 2021), mientras que una turbina eólica terrestre suele producir de 2,5 a 3 MW (National Grid, 2022). Esto significa que, para un proyecto a gran escala, podría optarse por energías más caras en lugar de energías renovables, ya que generan mi potencia para dar cuenta de la gran demanda.

Además, es importante tener en cuenta que, para cubrir el problema de la intermitencia de las energías renovables, las infraestructuras de almacenamiento suelen ir acompañadas de infraestructuras de energías renovables. Estas infraestructuras pueden requerir mucho capital y no se tienen en cuenta en los cálculos del LCOE vistos anteriormente, lo que implicaría un LCOE mucho mayor para dichas energías renovables.

Para tener en cuenta ese elemento de intermitencia posterior, Shen et al. (2020) llevaron a cabo una revisión de los distintos cálculos reales del coste nivelado de las energías renovables variables. A la forma tradicional de medir el LCOE, utilizando la inversión de capital, los costes operativos recurrentes y la producción de la planta, se añadieron varios elementos nuevos. En el documento se identifica un método que utiliza un factor de riesgo para calcular el LCOE. Dicho método utiliza como variables adicionales el precio del carbono y una prima de riesgo para los diversos riesgos que conllevan las distintas fuentes de energía. Nótese que para este método los valores de LCOE resultantes se expresan como proyecto para el año 2050. Por lo tanto, utilizaremos estos valores sólo para una comparación relativa, en lugar de compararlos con los estudios anteriores detallados anteriormente. Los resultados se presentan en el siguiente cuadro resumen, con cifras que se han convertido a \$/MWh para que coincidan con las unidades utilizadas a lo largo de esta sección.

	Método con factor de riesgo (\$/MWh)
Solar	30 – 60
Eólico (no especificado)	40 – 100
Carbón	150 – 220
Gas	110 – 200

Figura 20: Cálculo del LCOE con un factor de riesgo que tiene en cuenta la intermitencia y otros riesgos (Shen et al, 2020)

Por lo tanto, podemos ver que también en este caso el LCOE de las energías renovables es altamente competitivo con los combustibles fósiles, con valores que a veces son casi tres o cuatro veces inferiores. En consecuencia, el coste puede considerarse una importante ventaja competitiva a la hora de decidir sobre una central de producción de electricidad.

Podemos resumir los cálculos de LCOE anteriores en la siguiente tabla:

(\$/MWh)	Lazard (2023) ²⁰	IEA (2022) ²¹	Shen et al. (2020) (promedio, valor en 2050)
Solar PV “utility scale”	60	42,5	45
Eólico “Onshore” ²²	49,5	45	70
Eólico “Offshore”	106	100	70
Nuclear	126	96,25	n.a.
Carbón	109	102,5	185
Gas	97,5	106,25	155

Figura 21: Tabla resumen de los valores medios de LCOE observados para las distintas fuentes de energía

²⁰ Media entre los valores bajos y altos de la escala para las zonas llanas de la figura 18.

²¹ Media simple del LCOE de las cuatro regiones. Suponemos que los LCOE se han calculado utilizando el mismo método, sin tener en cuenta la producción eléctrica total ni la demanda de la región.

²² Valores sin almacenamiento, para el análisis de Lazard en particular.

Por lo tanto, a partir de los valores agregados anteriores, podemos ver que las energías renovables proporcionan una ventaja competitiva de costes en relación con su competidor de energía convencional. Puede afirmarse que el cambio a las energías renovables presenta una eficiencia de costes basada en el análisis LCOE, lo que implica que se obtendrían beneficios al cambiar a un sistema energético totalmente renovable.

Sin embargo, el LCOE no puede ser el único indicador del coste de pasar a un modelo de energía renovable, ya que en él no se incluyen muchos otros factores, en particular la importantísima demanda de suministro eléctrico. En un artículo para la revista *Energy and Environmental Science*, Jacobson et al. (2022) intentaron calcular cuánto costará a 145 países de 24 regiones distintas depender plenamente de las energías renovables. Las regiones se dividen para que los investigadores analicen el impacto en las redes eléctricas posteriores. El trabajo utiliza un modelo centrado únicamente en la energía eólica, solar fotovoltaica e hidráulica, para una transición efectiva a más tardar en 2050, pero con el 80% de la infraestructura instalada en 2030. Además, el estudio integra los costes resultantes de la implantación de sistemas de baterías y los beneficios económicos derivados de la creación de empleo resultante, incluida la compensación causada por los puestos de trabajo cesados en la producción de energía convencional.

Los resultados de esa investigación arrojaron un coste total de aproximadamente 61,5 billones de dólares, que se amortizarán en unos 6 años tras la implantación, debido al importante ahorro energético privado anual (de 17,8 a 6,7 billones de dólares anuales) y al ahorro social, es decir, los beneficios para la salud y el clima derivados de dicha implantación. Además, el estudio estima que la implantación de este plan de energías renovables sólo requerirá una cobertura adicional de la huella terrestre inferior al 1%. Esto significa que dicho sistema sólo requerirá dedicar menos del 1% de la superficie terrestre mundial, además de lo que actualmente cubre nuestro actual sistema de producción de energía.

Para dar una idea de la escala de la cifra de 61,5 dólares anunciada en el documento anterior, el PIB mundial en 2022 ascendió a casi 95 billones de dólares, y la mayor economía, la de Estados Unidos, representó 25,5 billones de dólares de esa producción económica (O'Neill, 2023). En 2021, Estados Unidos gastó sólo el 42,36% de su PIB en gasto público (IFM, 2023^b), lo que incluye, por ejemplo, gastos sanitarios, de defensa o sociales. Esto implica que la aplicación del plan desarrollado en el documento de Jacobson requeriría dos tercios de la producción económica mundial, mientras que los gastos de los países suelen oscilar entre el 40 y el 60% del PIB. Además, estos gastos no se destinan únicamente a energía, sino también a defensa, sanidad o asuntos sociales.

Por lo tanto, el documento de Jacobson et al. (2022) nos da una idea de un coste para cambiar a las energías renovables, aunque este cambio dependerá en última instancia de muchos factores que son difíciles de considerar en su conjunto. En general, aunque podemos afirmar que no existe un único coste para llevar a cabo la transición hacia las energías renovables, hemos observado que existen algunos beneficios económicos claros derivados de la transición. Entre estos beneficios económicos se incluyen los impuestos sobre el carbono, las subvenciones gubernamentales a las energías renovables, la reducción de los costes de capital o la ausencia de costes de combustible. Las ventajas y desventajas de esta transición se detallarán en las próximas secciones.

Beneficios

Impuesto sobre el carbono

Como se ha visto anteriormente, las emisiones de carbono son uno de los principales responsables de los problemas de calentamiento global. Estas emisiones de carbono se producen como una difusión de dióxido de carbono, un gas, en el aire, que tiene lugar especialmente en la combustión de un combustible fósil. Estas combustiones son a menudo el resultado del funcionamiento de un vehículo de motor o de la combustión de un combustible fósil para un proceso industrial.

Al abordar los problemas y las consecuencias del calentamiento global, los gobiernos y las instituciones intentan limitar estas emisiones de carbono. Una medida fundamental para limitar estas emisiones es imponer un impuesto sobre el carbono, que consiste en imponer un precio económico a cada tonelada de CO₂ equivalente quemada. En su revisión bibliográfica sobre el tema, Koppl y Schratzenstaller (2022) constatan que 46 jurisdicciones²³ ya aplican regímenes fiscales sobre el carbono. Dentro de estas jurisdicciones, identificamos Islandia, estudiada anteriormente en esta investigación, que aplicó en 2010 un impuesto de 34,25 \$/tCO₂e sobre el uso de combustibles fósiles. En conjunto, estas 46 jurisdicciones cubren el 23% de las emisiones de GEI de todo el mundo, y estos impuestos afectan al 5,7% de las emisiones mundiales de GEI. La siguiente tabla presenta los tres mayores y menores impuestos sobre el carbono, y su contribución relativa a las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero.

²³ El documento utiliza el término "jurisdicción" en lugar de "país", ya que algunos estados de un mismo país pueden tener un impuesto sobre el carbono en vigor, mientras que el país en su conjunto no lo tiene.

	Año de aplicación	Porcentaje de GEI mundiales cubiertos	Precio (\$/tCO ₂ e)
Uruguay	2022	0,01%	137,30
Suecia	1991	0,05%	129,89
Liechtenstein	2008	<0,01%	129,87
...
Islandia	2010	0,01%	34,25
...
Japón	2012	1,82%	2,36
Ucrania	2011	0,39%	1,03
Polonia	1990	0,03%	0,08

Figura 22: Mayor y menor impuesto sobre el carbono observado en el papel de Koppl y Schratzenstaller (2022)

Además de estos valores, es importante tener en cuenta las emisiones de las distintas fuentes de energía. En la siguiente tabla se enumeran las emisiones por fuentes de energía en Francia.

	Centrales de carbón	Centrales de petróleo	Centrales de gas	Plantas de biocarburantes (residuos)
Emisiones (tCO ₂ /MWh)	0,986	0,777	0,429	0,494
Max impuestos pagados (\$/MWh)	135,38	106,68	58,90	67,83
Min impuestos pagados (\$/MWh)	0,08	0,06	0,03	0,04

Figura 23: emisiones de carbono según la fuente de energía (RTE, 2023)

La tabla anterior no incluye la energía nuclear, hidráulica, geotérmica, eólica o solar fotovoltaica, ya que se considera que tienen emisiones iguales o próximas a cero. En la tabla también se presentan los impuestos máximos que se pagarían en los respectivos países, Uruguay para el impuesto máximo y Polonia para el mínimo. Como podemos ver, el rango es bastante amplio debido al valor mínimo muy bajo, pero también podemos observar impuestos importantes en el límite superior, así como en Islandia. Por otro lado, las energías renovables y la nuclear no se ven afectadas por el impuesto sobre

el carbono. Por lo tanto, las energías renovables son muy interesantes en relación con el impuesto sobre el carbono, ya que permiten evitar los impuestos sobre el carbono.

Subsidios

Las subvenciones son contribuciones financieras que proporciona el Estado para apoyar la actividad de un sector o una empresa. Suelen concederse para proteger los intereses de un país, sus ventajas competitivas o para recompensar iniciativas prometedoras. En lo que respecta al sector energético, las subvenciones que concede el Estado se hacen bien para impulsar un recurso presente en el país, bien para animar a los proveedores de energía a cambiar a soluciones energéticas más ecológicas. Como resultado, dentro de los países que más subvencionan las energías fósiles, identificamos países con importantes recursos de combustibles fósiles, como Rusia, Arabia Saudí o China (IEA 2022).

En cambio, los países que carecen de estos recursos son partidarios de conceder subvenciones a las energías renovables. Como resultado, se ha observado que las subvenciones dirigidas a iniciativas de energías renovables han aumentado en los últimos años (IEA 2022). Aunque actualmente las subvenciones se destinan principalmente a los combustibles fósiles y a su posible descarbonización, se prevé que se desplacen progresivamente hacia las energías renovables, los vehículos eléctricos y la eficiencia energética (Taylor, 2020). Estas subvenciones pueden adoptar la forma de ayudas directas a la implantación de energías renovables, condiciones de préstamo favorables o financiación de la investigación y el desarrollo en torno a estas energías.

Además, los gobiernos aplican ahora tarifas reguladas o “Feed-in Tariffs”, es decir, una política que obliga a las redes nacionales o regionales a comprar energías renovables de todo tipo a un precio fijo durante un periodo de tiempo determinado. Se cree que estas tarifas fomentan la inversión en infraestructuras de energías renovables al garantizar unos ingresos mínimos para compensar los costes de inversión iniciales y cubrir las fluctuaciones del precio de la energía. Según la base de datos de la OCDE (OCDE c, 2023), 54 países han estado aplicando Feed-in Tariffs, y 19 de ellos todavía tienen estas tarifas en vigor en 2019. Entre estos países se encuentran grandes economías, como China, India o Alemania.

Como resultado, las subvenciones y las tarifas reguladas crean un ecosistema estimulante para las energías renovables, animando tanto a las empresas energéticas públicas como a las privadas a seguir invirtiendo en capacidades de energías renovables y, por tanto, a pasar progresivamente de los combustibles fósiles a las energías renovables.

Soberanía energética

Otro resultado positivo de las energías renovables es la consiguiente autonomía y soberanía que otorgan al país. En efecto, al producirse las energías renovables dentro del país con recursos naturales infinitos, no requiere la importación de energía primaria, como los combustibles fósiles, ni de electricidad de países extranjeros. Por consiguiente, el país ya no depende de las negociaciones con otros países para abastecerse de energía. En última instancia, esto permite al país ser menos vulnerable a las fluctuaciones de precios y a las inestabilidades políticas.

Esto es muy importante, ya que en el pasado los precios de la energía y la electricidad se han visto muy afectados por situaciones geopolíticas, como las crisis del petróleo o las guerras. El hecho de que las energías renovables se produzcan dentro del país permite al Estado tener un mayor control y unos precios de la electricidad más constantes.

Centrarse en las energías renovables también permite desarrollar una industria nacional, que crea tanto puestos de trabajo como conocimientos, que en última instancia benefician al país en su conjunto. La curva de aprendizaje de las energías renovables permite que el sector aumente de tamaño y mejore su eficiencia, con trabajadores más cualificados y tecnologías mejoradas. El resultado final de este efecto es que los costes se reducen en última instancia a medida que la industria madura, y la tecnología se desarrolla y despliega de forma más eficiente a nivel nacional (Huenteler et al., 2016). Este es, en particular, el caso de Islandia y Costa Rica, ya que iniciaron su transición a las energías renovables muy pronto, centrándose especialmente en una fuente de energías renovables que les permitió adquirir amplios conocimientos sobre esa tecnología.

Externalidades positivas para la salud

La primera externalidad positiva con respecto a la salud es, obviamente, la reducción de las emisiones de todo tipo. En efecto, cuando se utilizan combustibles fósiles, se emiten a la atmósfera gases de efecto invernadero, entre ellos dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno y partículas contaminantes. Estos contaminantes son directamente perjudiciales para la salud humana, ya que pueden provocar enfermedades respiratorias.

La otra consecuencia de estas emisiones es su contribución final al calentamiento global. Al liberarse carbono a la atmósfera, contribuye al aumento de la temperatura global, lo que acaba modificando los estándares ecosistémicos y meteorológicos, creando condiciones climáticas anómalas que, en última

instancia, pueden provocar situaciones peligrosas para la humanidad, como sequías, olas de calor o tormentas.

Las energías renovables también presentan la ventaja de no necesitar agua para enfriar sus centrales, como las de carbón o las nucleares. Esto, en última instancia, evita que el agua se contamine en dichos procesos de refrigeración, lo que después beneficia a las comunidades locales que podrían consumir agua más limpia.

Por último, como se detalla más adelante, las energías renovables permiten a las zonas remotas acceder a la electricidad. En última instancia, esto permite a estas comunidades acceder a la energía y, por tanto, beneficiarse de infraestructuras sanitarias o de una asistencia sanitaria respaldada por la energía.

En conjunto, estas externalidades sanitarias positivas benefician al Estado en su conjunto, ya que reduce su gasto en sanidad y fomenta su inversión en ciudadanos que pueden vivir más tiempo, con mejor salud y, por tanto, contribuir más tiempo a la economía.

Precios estables de la electricidad

Como ya se ha comentado, las energías renovables proporcionan un marco más estable para las producciones energéticas, ya que su sistema energético no se alimenta de recursos primarios de países extranjeros y, por tanto, no depende del contexto geopolítico.

A modo de ejemplo, si se comparan los precios de la electricidad en Islandia, con una producción eléctrica casi totalmente a partir de fuentes renovables, con los de Polonia, que depende en más de un 80% de los combustibles fósiles, y en particular del carbón (IEA, 2023), se observan claras diferencias.

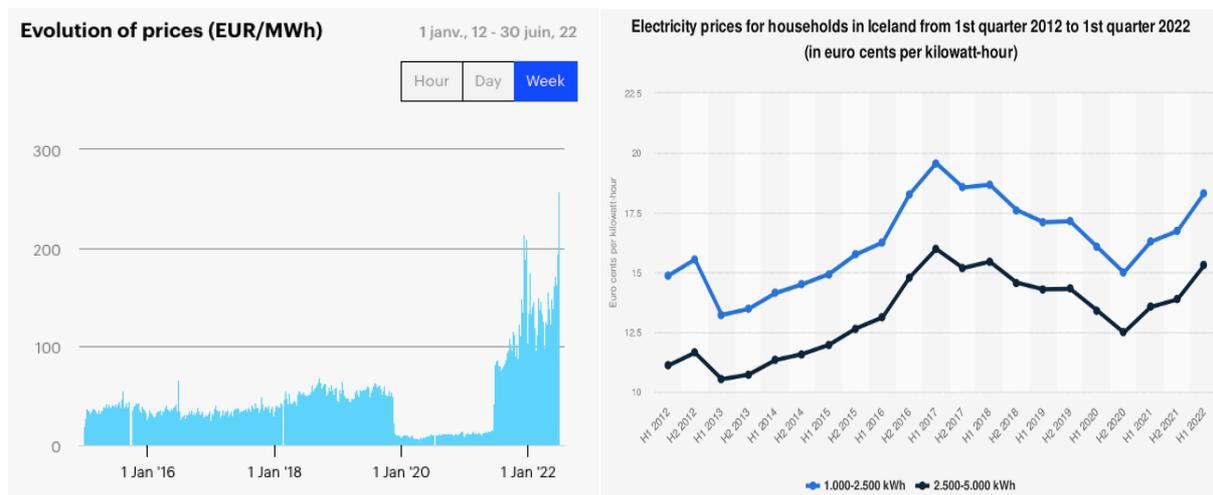


Figura 24: Precios de la electricidad en Polonia (izquierda) e Islandia (derecha) de 2012 a 2022 (IEA, 2023) (Statista b, 2023)

Así, podemos observar que Polonia, muy dependiente de los combustibles fósiles, se ha visto ampliamente afectada por las turbulencias generadas por la crisis covídica y sus efectos duraderos, con precios que cayeron en picado en 2020 antes de alcanzar máximos históricos en los momentos de recuperación. Por otro lado, Islandia fue capaz de asimilar la compleja situación, recuperando los precios anteriores a la crisis covídica en 2022, sin que se produjeran picos anormales que afectaran a todo el sector. De hecho, las fluctuaciones de los precios de la energía afectan en gran medida a los proveedores de energía en su planificación financiera y sus operaciones diarias, ya que crea una gran incertidumbre que, en última instancia, limita la inversión.

Varios

Además, las energías renovables, al poder instalarse en zonas remotas, pueden servir para extender el alcance eléctrico de un país a zonas alejadas. Junto con las microrredes, los paneles solares, los parques eólicos o las plantas geotérmicas pueden cubrir el suministro de energía de comunidades situadas en lugares remotos de un país.

Otra externalidad positiva de las energías renovables es que existen varios tipos de energías renovables, lo que permite crear un mix energético para disponer de un suministro energético diversificado en el país.

Desventajas

Intermitencia

La intermitencia es una de las principales deficiencias de las energías renovables, si no la principal, en particular en el caso de la energía eólica y solar. Corresponde al hecho de que la producción de las energías renovables no puede controlarse ni suponerse constante a lo largo del tiempo. Por ejemplo, el sol no brilla durante las 24 horas del día, del mismo modo, el viento no sopla constantemente todos los días. Esta cuestión de la intermitencia plantea otro problema, ya que la principal complejidad del sector energético es ajustar la oferta y la demanda, dado que la electricidad es volátil y difícil de almacenar. Como consecuencia, el pico de demanda corresponde a las horas de la mañana y al comienzo de la tarde noche, cuando la gente vuelve a sus casas. Estas horas pueden no coincidir con la producción de electricidad a partir de energías renovables, lo que crea la necesidad de contar con soluciones de respaldo y sistemas de almacenamiento para suavizar el consumo a lo largo del tiempo. En última instancia, estos factores pueden tener un gran coste, que se estudiará más adelante.

La intermitencia también implica que la energía solar y/o eólica deben acoplarse, ya sea juntas o con otra fuente de energía, para tener en cuenta los periodos de baja producción o las situaciones de máxima demanda. Como ejemplo, en el caso de Tilos estudiado anteriormente, la mayor parte de la electricidad la produce la turbina eólica, que sin embargo está respaldada por una pequeña unidad solar, para los periodos en los que el viento no sopla lo suficiente para cubrir las necesidades de la isla. La red también está respaldada por generadores de reserva alimentados con petróleo y conectados a una red más amplia con otras islas que dependen de combustibles fósiles. Estas soluciones de respaldo, alimentadas en gran medida por combustibles fósiles, son además costosas de hacer funcionar, ya que requieren ser puestas en marcha en ocasiones concretas, y los principales costes asociados a estas infraestructuras se producen al encenderlas.

Una investigación asociada al tema calculó el coste de la intermitencia para una unidad solar fotovoltaica, probado en el contexto de una aplicación en el suroeste de Arizona, una zona con importante luz diurna. Encontró que para una energía solar perfectamente despachable con un factor de capacidad del 20%, con un coste de 89,8 \$/MWh, el coste de la intermitencia impredecible es de 12,5 \$/MWh, que por lo tanto representa el 13,92% del coste global (Gowrisankaran et al., 2011). Por lo tanto, podemos ver que existe un coste significativo asociado a los riesgos de intermitencia de las energías renovables, asociado a las soluciones de respaldo que deben instalarse y funcionar como último recurso.

Huella terrestre

La otra cuestión importante que plantean las energías renovables es la intensidad de suelo de sus infraestructuras. Cuando los países quieren pasarse a las energías renovables, deben tener en cuenta que los parques eólicos a veces cubren más terreno que una central nuclear, mientras que esta última puede producir hasta 100 veces más electricidad con la misma superficie. En la tabla siguiente se detallan las diferencias de cobertura del terreno en metros cuadrados en relación con los MW de electricidad producidos.

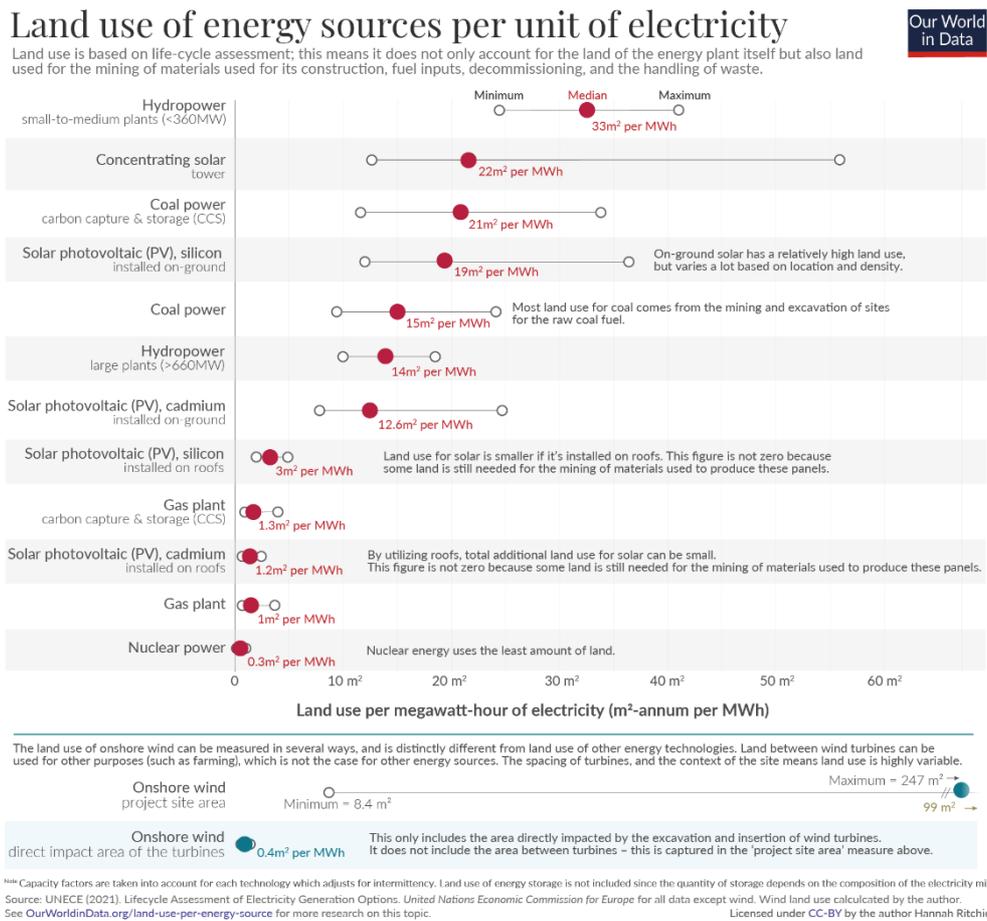


Figura 25: Uso del suelo de las distintas fuentes de energía (Ritchie, 2022)

La tabla anterior ha sido elaborada por Ritchie (2022) a partir de datos procedentes del informe “Carbon Neutrality in the UNECE Region” de la Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas: *Integrated Life-cycle Assessment of Electricity Sources*. Como podemos ver, las centrales de gas y nucleares son mucho más eficientes en términos de uso del suelo que las fuentes de energía renovables. En el gráfico anterior, no tenemos en cuenta las aplicaciones fotovoltaicas sobre tejado, sino sobre suelo, ya que se trata de unidades fotovoltaicas para grandes producciones, mientras que

las aplicaciones sobre tejado son para distribuciones limitadas. En cuanto a la energía eólica, podemos ver que los datos son muy dispersos, debido al diferente uso del terreno bajo las turbinas eólicas, ya que la torre de la turbina no cubre mucho terreno, mientras que su sombra y sonido podrían, por otro lado, afectar al ecosistema natural del terreno del parque eólico. En general, podemos ver que las centrales de gas o nucleares son más de 10 veces más eficientes que las instalaciones hidroeléctricas o solares fotovoltaicas. El carbón, por su parte, tiene la mayor parte de su cobertura de suelo procedente de la propia extracción de los productos del carbón. Por lo tanto, se necesitará entre 10 y hasta 100 veces más superficie para pasar de un sistema energético basado en el gas y la energía nuclear a sistemas de energías renovables basados en fuentes de energía solar fotovoltaica e hidroeléctrica.

También es importante señalar que esta cobertura del suelo afecta en última instancia a la biodiversidad y al clima del país, ya que la energía hidroeléctrica modifica el contexto hidráulico de un país, la energía solar fotovoltaica cubre gran parte de tierras que no se utilizan en lo sucesivo para vivir ni con fines agrícolas y las turbinas eólicas pueden desestabilizar la fauna y la flora del lugar donde se van a implantar.

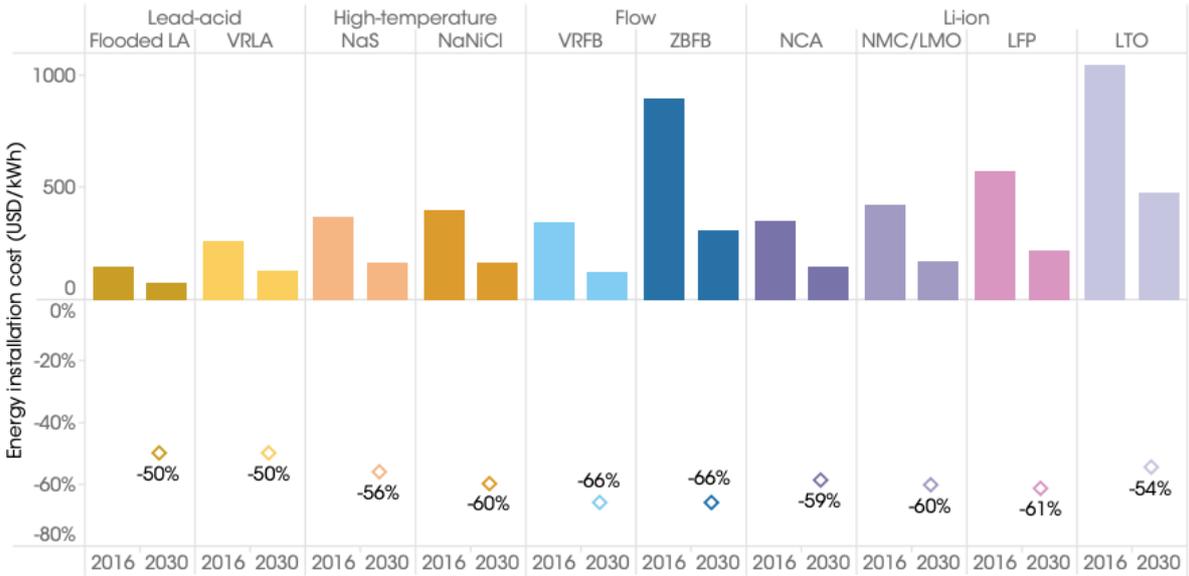
La misma cuestión de la cobertura del suelo se relaciona también con la aceptación de los proyectos de energías renovables. De hecho, las comunidades locales suelen rechazar los proyectos de presas hidroeléctricas o parques eólicos porque no les gusta la contaminación visual o acústica, ni las consecuencias para el ecosistema.

Coste del almacenamiento y redes inteligentes

Para abordar la primera cuestión expuesta en este apartado, una solución es hacer uso de baterías y sistemas de redes inteligentes integrados con la energía, tal y como se ha hecho en el proyecto Tilos. En efecto, el proyecto consistió en la implantación de una turbina eólica y una unidad solar fotovoltaica que se conectaron a una red eléctrica. Dicha red eléctrica estaba respaldada por un sistema de baterías de nuevo desarrollo, así como por un contador inteligente que procesaba los datos de consumo y producción para anticiparse a los picos y, en última instancia, suavizar el consumo.

Aunque existe una amplia gama de tipos de baterías, es sabido que el número de baterías disponibles en el mercado aumentará drásticamente en los próximos años, con el consiguiente aumento de las necesidades debido al incremento de la producción de energías renovables y la electrificación de la

economía²⁴. Así pues, con la mejora de las tecnologías y las consiguientes subvenciones concedidas al respecto, se prevé que el precio del almacenamiento de energía disminuya en los próximos años. Sin embargo, este precio del almacenamiento de energía, para todas las tecnologías, es por ahora significativo, como podemos ver en la tabla siguiente.



Note: LA = lead-acid; VRLA = valve-regulated lead-acid; NaS = sodium sulphur; NaNiCl = sodium nickel chloride; VRFB = vanadium redox flow battery; ZBFB = zinc bromine flow battery; NCA = nickel cobalt aluminium; NMC/LMO = nickel manganese cobalt oxide/lithium manganese oxide; LFP = lithium iron phosphate; LTO = lithium titanate.

Figura 26: Coste del almacenamiento de electricidad en baterías en 2016 y su coste previsto en 2030 en \$/kWh (IRENA, 2017)

Como podemos ver en la tabla anterior, el precio actual del almacenamiento de electricidad es elevado, oscilando entre unos 80 y casi 800 \$/kWh. Esto contrasta en gran medida con los valores de LCOE de las energías renovables observados anteriormente. Aunque un kWh de electricidad producido no induce la creación conjunta de un kWh de capacidad de almacenamiento de energía, sigue suponiendo un coste adicional significativo para los proyectos de energías renovables. En consecuencia, los proyectos de energías renovables son, en definitiva, más costosos y difíciles de financiar.

Del mismo modo, las energías renovables y los dispositivos de almacenamiento suelen ir acompañados de programas de medición y redes inteligentes. Por redes inteligentes entendemos todos los dispositivos de procesamiento de datos que se hacen para recopilar y hacer uso de los datos con el fin último de satisfacer mejor la demanda y la oferta, pero sobre todo para garantizar que la demanda sea

²⁴ Este desafío se explicará con mayor amplitud en la parte sobre los desafíos que viene después.

satisfecha por la oferta en todo momento. Según Vitiello et al. (2022), la medición inteligente de los hogares costó a los países europeos donde se aplicó 35 millones de euros en 2014, con un proyecto para 2021 de 3.080 millones de euros para desarrollar 407 proyectos de redes inteligentes en toda Europa, de los cuales 2.320 millones serán financiados por la Unión Europea. Sin embargo, es importante tener en cuenta que, aunque se hace crucial en los sistemas de energía renovable, estos contadores y redes inteligentes también son relevantes y se utilizan para otras aplicaciones energéticas. Por lo tanto, aunque este coste es conocido y comprendido en el caso de las energías renovables, también se habría producido en el caso de los combustibles fósiles, ya que en última instancia se utiliza para reducir costes y se pretende que tenga un impacto financiero positivo a largo plazo.

Conexión con la red

Cuando se desarrolla un nuevo programa de producción de electricidad, sea del tipo que sea, es necesario conectarlo a la red regional existente. Esto conlleva un coste que suelen asumir las empresas públicas encargadas del buen funcionamiento del sistema energético del país. En el caso de las energías renovables, la dificultad viene del hecho de que las instalaciones de energías renovables suelen estar situadas en zonas remotas. Así, las zonas más ventosas, mejor expuestas al sol o con mayor acceso a recursos hidroeléctricos o geotérmicos pueden no estar cerca de las zonas de mayor demanda. Como consecuencia, necesitan largas líneas eléctricas para transportarlas desde donde se producen hasta donde se consumen.

Los recursos naturales, como el sol, el agua o el viento, tras convertirse en electricidad, se transforman en electricidad de alta tensión²⁵ para ser transportada a lo largo de líneas de transmisión. Estas líneas transportan la electricidad de un punto a otro, con un grado de eficiencia que se calcula como la electricidad perdida a lo largo de la línea por kilómetros recorridos. Al llegar a su destino, se convierte de nuevo en intensidad de tensión más baja, donde se entrega al consumidor final. Para largas distancias, se han desarrollado líneas de muy alta tensión, que permiten una menor electricidad por mayor distancia recorrida. Por lo tanto, al transportar la electricidad de un punto a otro, observamos en primer lugar que hay pérdidas de electricidad y que requiere infraestructuras costosas, es decir,

²⁵ La tensión corresponde a la intensidad de la electricidad.

líneas de transmisión y convertidores. Por lo tanto, tener la producción separada del consumo es un contratiempo para las energías renovables, ya que tiene un coste incremental.

Disponibilidad de recursos

Por último, aunque se ha dicho que las energías renovables otorgan soberanía en cuanto al consumo de energía, esto debe contrastarse con la disponibilidad de recursos para construir las infraestructuras de energías renovables. En efecto, los paneles solares fotovoltaicos requieren silicio o cadmio, mientras que las turbinas eólicas necesitan acero y resina. Algunos países pueden no tener acceso a estos recursos primarios y por lo tanto abastecerse de ellos, haciendo que estos países dependan de su relación con sus proveedores de materias primas.

Por otra parte, la mayoría de los países no disponen de infraestructuras nacionales para las energías renovables y se limitan a abastecerse en el extranjero. Por ejemplo, China fabrica actualmente entre el 60 y el 80% de las turbinas eólicas terrestres del mundo (IEA, 2022). En consecuencia, el despliegue de las energías renovables podría depender de las relaciones comerciales entre ambos países.

Desafíos

Electrificación de la economía

Las energías renovables se utilizan en su gran mayoría para la producción de electricidad, mientras que la geotermia puede tener también algunas aplicaciones térmicas. Por lo tanto, depender en gran medida o exclusivamente de las energías renovables implica que la electricidad se utilice para todas las aplicaciones, incluidas las industriales o de transporte. En el caso de este último, implica pasar a una flota de transporte compuesta por vehículos propulsados por baterías eléctricas o biocombustibles. Los biocombustibles se están probando especialmente para el transporte aéreo, donde a veces se piensa que son difíciles de implantar. Como ya se mencionó en la introducción de esa tesis, los biocombustibles quedan fuera del ámbito de nuestro estudio. A continuación, nos centraremos en los vehículos eléctricos. Además de cambiar a los vehículos eléctricos, se trata de comprender el resto de las repercusiones que tendría, en relación con los puntos de recarga o las redes eléctricas, por ejemplo.

Como ejemplo, hemos visto que Costa Rica o Islandia, con una producción de electricidad realizada casi exclusivamente a través de energías renovables, siguen teniendo emisiones de carbono debidas al sector del transporte nacional. En este sentido, el transporte se alimenta esencialmente de petróleo,

que debe ser sustituido por vehículos eléctricos alimentados por energías renovables. Actualmente, la cuota de uso de electricidad en el transporte es inferior al 5%, ya que el transporte está muy dominado por el petróleo. En consecuencia, para alcanzar el objetivo Net Zero, la IEA (2022) calculó que la cuota de la demanda de electricidad deberá aumentar un 4% al año para alcanzar las metas fijadas por el objetivo Net zero. Esto implicará además una mayor participación de la electricidad en sectores en los que no se utiliza ampliamente, como el transporte (menos del 5%) y la industria (alrededor del 20%). En consecuencia, la producción de electricidad deberá aumentar en la misma proporción para cubrir la creciente demanda, lo que supondrá un gran reto en términos de combinación de suministros y adaptación de la red. De hecho, podría requerir la red, incluyendo nuevas líneas de transporte, conexiones de nuevas centrales eléctricas a la red, adiciones incrementales de contadores inteligentes o incluso ampliar la red a zonas remotas en ejes de transporte alejados de los polos de demanda para las cabinas de carga de vehículos eléctricos. La aplicación de estas medidas puede llevar mucho tiempo y ser costosa, lo que podría desincentivar a las administraciones públicas a realizar ese cambio. Esto supone un reto adicional para disponer de redes eléctricas fiables, ya que la demanda aumentará continuamente y, por tanto, la red estará mucho más solicitada. Por lo tanto, se necesitarían más soluciones de mantenimiento y respaldo para las horas de máxima demanda, con el fin de evitar que se produzcan apagones.

En términos de transporte, implica cambiar a una flota de vehículos eléctricos, desde vehículos personales a vehículos de reparto de cargas pesadas. La IEA (2022) señala que la mayor reducción de emisiones procederá de la electrificación de los vehículos ligeros y de la calefacción residencial, a través de una mayor eficiencia energética, así como de bombas de calor o dispositivos de calefacción electrificados, ya que la mayor parte de la calefacción residencial se realiza mediante gas natural.

También conlleva el reto de desplazar trabajadores de un sector a otro. Como algunos trabajadores están especializados en áreas relacionadas con los combustibles fósiles, van a quedar excluidos para las aplicaciones eléctricas y, por tanto, tendrían que adaptarse a estas nuevas tecnologías. Para los gobiernos y las empresas será un reto proporcionar a sus trabajadores la formación adecuada para adaptarlos a sus nuevas operaciones y ocupaciones.

Otro reto notable de la electrificación de la economía es la ciberseguridad. De hecho, a medida que las redes eléctricas se hacen más grandes, también se combinan cada vez más con dispositivos de medición inteligentes, que recopilan y procesan datos de hogares y empresas. En última instancia, estos datos deben protegerse de los ciberataques para que el sistema sea fiable, seguro y cuente con la confianza de las partes interesadas.

Disponibilidad de recursos

Como se ha visto anteriormente, un cambio masivo a las energías renovables implicaría una transición a nuevas tecnologías, como las turbinas eólicas, las infraestructuras fotovoltaicas solares basadas en silicio o las baterías basadas en litio para vehículos eléctricos. Sin embargo, una transición de tal envergadura requeriría una gran cantidad de los recursos actuales de la Tierra para fabricar e instalar las infraestructuras correspondientes.

En su artículo sobre la limitación de recursos para las energías renovables, Moreau et al. (2019) estudian la disponibilidad de los materiales necesarios si el mundo cambiara a un sistema energético totalmente alimentado por energías renovables. Aunque el análisis también tiene en cuenta las necesidades de almacenamiento posteriores creadas por la intermitencia de las energías eólica y solar, identifica 29 materiales utilizados para fabricar las infraestructuras y los dispositivos relacionados con las energías renovables, así como varios productos químicos utilizados para la producción de baterías. Los resultados se dividen en escenarios, donde el primero estudia únicamente las reservas, que corresponde al material que aún no se está explotando y sigue en bruto en la tierra. En el escenario, es probable que 8 materiales de los 29 metales identificados se hayan agotado para cuando se implante un sistema energético totalmente renovable en 2050. Sin embargo, si se tienen en cuenta los recursos actuales, que corresponden al material extraído disponible también, el potencial de reciclado de los materiales, y las necesidades de almacenamiento de las baterías, reducen el agotamiento de algunos materiales, haciéndolos disponibles para horizontes más largos. Al estudiar los recursos totales, por ejemplo, sólo 5 de estos materiales se agotarían en 2050 en caso de una gran aplicación de las energías renovables.

Asimismo, el estudio realizado por Klimenko et al. (2021), centrado en un sistema energético alimentado en gran medida por turbinas eólicas y respaldado por vehículos eléctricos alimentados por baterías, esboza la probable escasez de recursos para llevar a cabo la transición. El documento señala que es probable que el litio y el cobalto, utilizados para las aplicaciones de los vehículos eléctricos, se agoten si no se avanza rápidamente en la exploración de minas y el reciclaje de materiales. A falta de reciclaje, el documento también identifica el disprosio, un material utilizado para construir turbinas eólicas, como susceptible de tender al agotamiento en el contexto de la investigación.

Como ya se ha dicho, las baterías, necesarias para el transporte eléctrico, se fabrican esencialmente con cobalto y litio, dos recursos escasos. Pehlken et al. (2017) profundizan en la implicación de un aumento drástico de la demanda de baterías causado por la electrificación de la economía. Sus resultados constataron que la gestión de los recursos para fabricar nuevas baterías sería un reto clave

para la transición energética. Así, es muy probable que las reservas de litio se agoten antes de que se complete la transición, ya que el aumento de la demanda consumirá desde el 78%, en la hipótesis más baja, hasta el 248% de las reservas mundiales. Por otro lado, se cree que se necesitará el 50% de las reservas de cobalto para cubrir la creciente demanda de baterías. Así pues, el documento subraya la importancia de tener una visión global de la gestión de los recursos y de contar con un proceso de reciclado eficaz para recuperar los recursos utilizados actualmente.

En conjunto, podemos ver que la transición hacia las energías renovables requerirá una colaboración mundial para determinar la combinación adecuada de tecnologías que tengan en cuenta la escasez de recursos para construir las infraestructuras. Alternativamente, la escasez de recursos también puede suponer un reto para la energía a la hora de desarrollar tecnologías similares utilizando materiales alternativos disponibles en mayor cantidad. La escasez de metales también podría tener un impacto importante en el precio de la infraestructura, ya que las teorías económicas sostienen que a medida que un recurso escasea, su adquisición se encarece.

Colaboración mundial

Como ya se ha visto, los materiales utilizados para fabricar los dispositivos y las infraestructuras de las energías renovables son escasos. En consecuencia, pueden ser objeto de competencia internacional y de disputas geopolíticas críticas. Por ejemplo, las baterías para las infraestructuras de almacenamiento de energía procedentes de las energías renovables se fabrican principalmente con litio y cobalto, que pueden estar disponibles en cantidades limitadas en un futuro próximo. De ahí que la localización del material y sea clave para las decisiones de los países en su transición hacia energías más verdes. En el caso del litio, el 60% de las reservas mundiales conocidas en 2020 se reparten entre Chile (más del 43% de las reservas mundiales), Argentina y Bolivia. Australia también posee cerca del 22% de las reservas del metal (Hache et al., 2021). El impacto directo de esta disparidad en la localización de los recursos naturales es que los países que quieran pasar de una economía basada en los combustibles fósiles a otra basada en las energías renovables tendrían que mantener buenas relaciones geopolíticas con los propietarios de las reservas. Esto implica también que el mercado dependería en gran medida de la estabilidad de diversas economías. De ahí que destaque el importante reto y la necesidad de una colaboración mundial tanto en materia de reservas como de recursos para una transición adecuada a una economía impulsada por energías renovables.

Por otra parte, también es necesaria una colaboración mundial en lo que respecta a las tecnologías utilizadas para pasar a las energías renovables. Así pues, como las energías renovables contribuyen a

limitar tanto las emisiones de carbono como el calentamiento global, la transición energética beneficia a todos los países, incentivando a los que disponen de tecnologías desarrolladas a compartirlas con el exterior. En consecuencia, la Agencia Internacional de la Energía puso en marcha programas internacionales de colaboración tecnológica para compartir conocimientos sobre diversas fuentes de energía renovable. El objetivo de esa iniciativa es que los países con tecnologías avanzadas crucen sus conocimientos y los compartan con países con un desarrollo más incipiente en la materia. Islandia, como se ha visto anteriormente, un pionero de la energía geotérmica es un importante colaborador del programa de colaboración de energía geotérmica y miembro activo. En todos los organismos gubernamentales relacionados con el sector se destaca a menudo la voluntad del país de compartir sus conocimientos y tecnologías. Esto, a su vez, beneficia a los países voluntarios, ya que les proporciona los conocimientos de otras tecnologías para poder comparar críticamente su propia tecnología.

Así pues, la colaboración mundial es un gran reto para la adopción a gran escala de las energías renovables, tanto en términos de recursos como de tecnologías y conocimientos, para que la transición se produzca a gran escala.

Continuidad política

Aunque la elección de las fuentes de energía es a veces obra de empresas privadas, movidas por objetivos financieros, las principales decisiones sobre la combinación energética son decididas y/o inducidas por los gobiernos a través de inversiones, normativas y subvenciones.

De hecho, la transición a las energías renovables está estrechamente vinculada al contexto político de un país. El ritmo de las energías renovables viene determinado por la continuidad de las políticas decididas por un gobierno, es el resultado de una dinámica a largo plazo de decisiones políticas que implican el consenso entre partidos políticos opuestos sobre la necesidad de contar con un plan común para la transición a las energías renovables (Burke y Stephens, 2018). Por lo tanto, un reto importante para la transición hacia las energías renovables es el compromiso a largo plazo de un país estos objetivos, a pesar de las posturas políticas cambios en podría tener en el corto plazo. Las decisiones sobre energías renovables y combinación energética deben dissociarse de los partidos políticos y la ideología para integrarse en un objetivo común de mejora del bienestar del país.

Marco reglamentario

Como se ha visto anteriormente, los gobiernos pueden influir tanto directa como indirectamente en las nuevas inversiones realizadas en energías renovables. Tupy (2009) enumera las diversas palancas de que disponen los gobiernos para fomentar el aumento de las energías renovables, separadas en tres categorías:

7. **Promoción directa:** incluye las tarifas reguladas, que incentivan a los proveedores de energía a pasar a producir energías renovables al asegurarles unos ingresos mínimos por la venta de la electricidad producida. Las cuotas y los certificados verdes son también palancas financieras directas de los gobiernos para inducir a los operadores de servicios públicos a producir energías renovables. Imponen a las empresas de servicios públicos que una parte mínima de su suministro de electricidad proceda de energías renovables. Por último, los gobiernos también pueden conceder subvenciones, préstamos ventajosos o incentivos fiscales para aumentar la producción de energías renovables.
8. **Promoción indirecta:** son todas las medidas coercitivas impuestas a las energías fósiles. Pueden ser la reducción de las subvenciones concedidas a los combustibles fósiles o el lanzamiento de programas de impuestos sobre el carbono.
9. **Marco jurídico y reglamentario favorable:** eliminando los obstáculos para que las energías renovables accedan a la red eléctrica, suprimiendo las barreras técnicas, jurídicas y administrativas.

Así pues, podemos ver que los gobiernos disponen de varias palancas para estimular la transición hacia las energías renovables y depende de las instituciones las medidas correctas que deben tomarse de entre las mencionadas, para dar forma a la mejor transición posible para el país. Sin embargo, este reto está íntimamente ligado a la continuidad política mencionada anteriormente, ya que estas medidas deben aplicarse a lo largo del tiempo de manera uniforme y requieren coherencia.

Varios

Aunque la transición hacia una energía renovable viene acompañada de muchos más retos, hay otros tres que cabe destacar aquí.

El primero es el impacto medioambiental. Como se ha observado en el caso de Tilos, la instalación del aerogenerador ha estado sujeta a la aprobación del proyecto en cuanto al impacto que tendrá sobre la fauna, ya que la isla se considera refugio de una rara especie de águila. Costa Rica, por su parte, al igual que otros países que dependen en gran medida de la energía hidroeléctrica, ha tenido que realizar estudios exhaustivos sobre el impacto de sus infraestructuras hidroeléctricas en el ecosistema y la fauna, así como para las zonas pobladas que podrían verse arrastradas por el agua desplazada. Los proyectos de energía solar también están sujetos a estudios sobre el terreno, ya que pueden cubrir importantes extensiones de tierra que, por lo tanto, quedan excluidas de cualquier ocupación agrícola y afectan gravemente al equilibrio vital de las tierras cubiertas. En consecuencia, comprender y mitigar el impacto medioambiental de los proyectos de energías renovables es un reto importante para la ampliación de las infraestructuras de energías renovables.

En segundo lugar, la eliminación de los paneles solares, las turbinas eólicas o las baterías usadas constituye un serio reto para la economía en transición. De hecho, como se ha visto anteriormente, algunos de los materiales utilizados en estas tecnologías son muy escasos, por lo que existe una necesidad crítica de desarrollar un proceso de reciclaje junto con el aumento de las infraestructuras de energías renovables. Se prevé que en 2025 habrá 600 000 toneladas de baterías desaprovechadas y 78 millones de toneladas de paneles solares en 2050. En Europa podrían desecharse 300 000 toneladas de palas de aerogeneradores al año durante las dos próximas décadas. Además, como estas infraestructuras de energías renovables están pensadas para estar a la intemperie y soportar duras condiciones meteorológicas, son muy robustas, lo que las hace más difíciles de desechar y, por tanto, de reciclar (Scott y Bomgardner, 2019). De ahí que, a la hora de perfilar el horizonte de la transición energética, otro de los principales retos sea definir de antemano un plan para las infraestructuras desechadas y aprovechar al máximo los materiales y componentes. Además, las infraestructuras de energías renovables suelen durar menos que las centrales convencionales de combustibles fósiles. A modo de ejemplo, se prevé que los reactores nucleares funcionen durante unos 40 años, mientras que se calcula que los parques eólicos o las unidades solares fotovoltaicas tienen una vida útil de 25 años.

En tercer lugar, hay que considerar las limitaciones tecnológicas de las energías renovables y la electricidad. En efecto, la electricidad o el calor tienen densidades eléctricas²⁶ inferiores a las de otros combustibles fósiles, como el petróleo. De ahí que la sustitución del petróleo por la electricidad para

²⁶ La densidad energética corresponde a la cantidad de energía almacenada en una sustancia para un espacio o volumen determinado. Por ejemplo, un volumen de 1 metro cúbico de aceite proporciona más energía que una batería de litio actual de un volumen similar, debido a la mayor densidad energética del aceite.

el transporte de larga distancia, como la propulsión de un avión, resulte difícil. Encontrar alternativas, como recurrir más al ferrocarril y al transporte por carretera con energía eléctrica o utilizar la electricidad para producir otra energía más densa es, por tanto, esencial para una transición eficaz hacia una economía renovable y electrificada.

Resumen del segundo capítulo

En esta sección se ha visto que las energías renovables presentan múltiples ventajas de coste en relación con otras fuentes convencionales de energía. El cálculo LCOE utilizado para calcular los costes de la energía asociada a las energías renovables frente a los combustibles fósiles mostró que las energías renovables estaban asociadas a los costes de producción más bajos. Además, hemos visto que las energías renovables también aportan beneficios económicos y sociales adicionales.

Sin embargo, también hemos observado que las renovables presentaban varias deficiencias y retos que debían superarse en un futuro próximo para que su implantación a gran escala fuera eficiente. La siguiente tabla resume los costes, ventajas, inconvenientes y retos identificados, comenzando por los costes, comparando a continuación las ventajas y los inconvenientes mediante una lista y una breve descripción de los mismos y, por último, presentando los retos de la misma manera que se presentaron las ventajas y los inconvenientes.

Costes	LCOE max ²⁷	LCOE min
Solar PV “utility scale”	42,5	60
Eólico “Onshore”	45	49,5
Eólico “Offshore”	100	106
Nuclear	96,25	126
Carbón	102,5	109
Gas	97,5	106,25

Beneficios

Impuesto sobre el carbono	42 países ya aplican impuestos por tonelada de CO2 emitida, entre ellos Islandia.
Subsidios	Tarifas energéticas y subvenciones a la inversión en energías renovables.
Soberanía	Soberanía en materia de abastecimiento y producción de energía.

Desventajas

Intermitencia	La producción de ER es imprevisible y dispersa en el tiempo.
Huella terrestre	Las ER ocupan más terreno que las energías convencionales.
Coste del almacenamiento	Coste de las infraestructuras implantadas para mitigar los problemas de intermitencia.

²⁷ Excluimos el análisis de Shen et al. (2020), ya que presentan valores de proyectos para 2050.

Externalidades sanitarias positivas	Reducción de las enfermedades causadas por la combustión de combustibles fósiles.	Conexión con la red	Conexión de la energía producida a distancia con la red eléctrica principal.
Precios estables	Disminución de las fluctuaciones de los precios de la electricidad causadas por la agitación geopolítica exterior.	Disponibilidad de recursos	Disponibilidad de recursos primarios para fabricar las tecnologías de las ER.
Otros	Acceso de las zonas remotas a la electricidad y diversificación de la combinación energética.		

Desafíos

Electrificación	Sustitución de infraestructuras basadas en combustibles fósiles por dispositivos electrificados.
Disponibilidad en recursos	Disponibilidad de material global utilizado para la fabricación de infraestructuras de ER.
Colaboración global	Colaboración en el acceso a recursos o tecnología.
Continuidad política	El plan a largo plazo para las energías renovables no se ve afectado por los cambios políticos.
Marco regulatorio	La normativa y el marco jurídico favorecen las inversiones en energías renovables.
Otros	Impacto medioambiental de las energías renovables, eliminación de las infraestructuras al final de su vida útil y limitaciones tecnológicas.

Figura 27: Costes, ventajas, inconvenientes y retos de las energías renovables (Lazard 2023) (IEA 2022)

APLICABILIDAD A LA ARGENTINA

Condición natural

Como se ha visto anteriormente, en el ejemplo de Tilos, Islandia y Costa Rica el primer paso hacia un sistema energético totalmente renovable es que la producción de electricidad proceda casi en su totalidad de infraestructuras de energías renovables. Los tres casos anteriores han logrado ese primer paso, con una energía renovable dominante respaldada por una o una combinación de otras. En Tilos, el sistema energético se alimenta principalmente de una turbina eólica respaldada por una unidad solar fotovoltaica y, en casos extremos, por un generador alimentado por petróleo. En Islandia, la electricidad y el calor se generan principalmente a partir de las infraestructuras de energía geotérmica del país, apoyadas por energía hidroeléctrica adicional y turbinas eólicas. Por último, la red eléctrica de Costa Rica depende principalmente de la energía hidroeléctrica, apoyada también por infraestructuras geotérmicas, de biocombustibles y eólicas (IEA, 2022).

La disparidad en la principal fuente de energía renovable se debe enteramente a las condiciones geográficas de los respectivos países y regiones. Como se ha visto en la primera parte de esa tesis, según la ubicación del lugar de interés, éste puede presentar, o no, un potencial eólico, solar o geotérmico interesante para la implantación de energías renovables. En esa misma parte de la tesis, hemos analizado el potencial eólico y solar de estos lugares de interés, utilizando un atlas global solar y eólico, aportando valores medios para la potencial implantación en la isla de dichas tecnologías. En el anexo G están disponibles los mapas globales de dichos atlas, con el fin de tener una visión más amplia del potencial de cada país. Por otro lado, la figura 11 proporciona un mapa del potencial de energía geotérmica de las diferentes regiones del mundo, y el grado en que la energía geotérmica podría ser explotada por un país.

Además de las tres fuentes de energías renovables mencionadas, es necesario integrar la energía hidráulica como otra alternativa para aumentar la producción de energías renovables. En un intento de trazar un mapa del potencial de la energía hidroeléctrica en cada región del mundo, Tefera y Kasiviswanathan (2022) llevaron a cabo todo un análisis de las aplicaciones potenciales de la energía hidroeléctrica siguiendo las limitaciones técnicas, económicas y medioambientales. Los costes económicos mencionados anteriormente corresponden a una hipótesis de viabilidad adoptada por los autores, según la cual, por encima de un determinado nivel de LCOE, el proyecto no es viable por ser demasiado caro para que lo acometa una empresa pública o privada. Por otro lado, derivaron dos

escenarios de fiabilidad del flujo²⁸, uno con una fiabilidad del flujo del 30% y el segundo con una fiabilidad del flujo del 95%, teniendo el primero una producción potencial resultante significativamente superior al otro. En el curso de esa tesis, se centrará en el último, ya que tiene la hipótesis más estricta y, por tanto, ofrece resultados más fiables. El mapa mundial resultante está disponible a continuación.

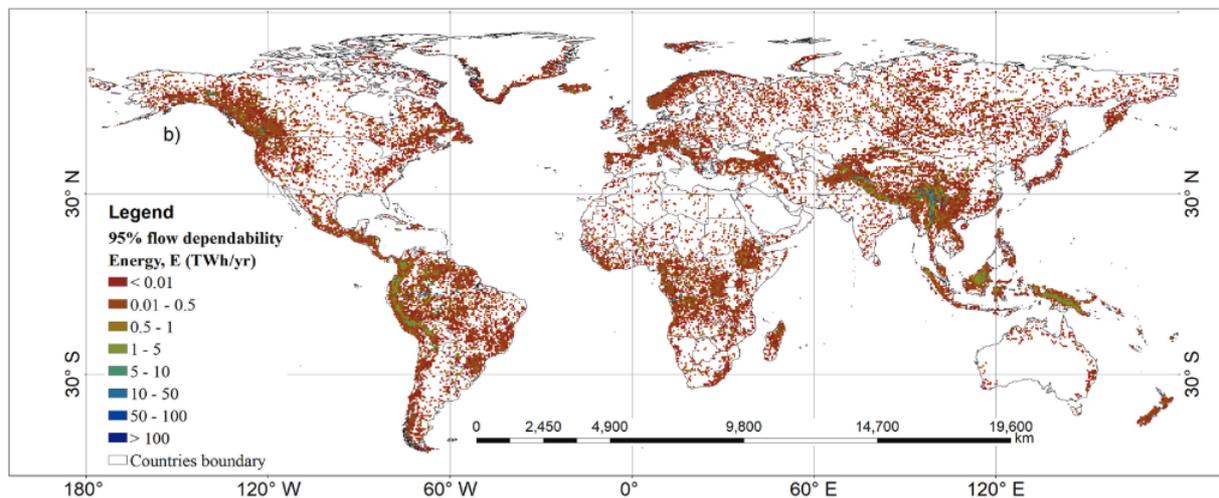


Figura 28: Distribución espacial de la energía hidroeléctrica explotable (Tefera y Kasiviswanathan, 2022)

Este mapa se ha realizado teniendo en cuenta también las zonas protegidas y urbanas que a menudo restringen los proyectos hidroeléctricos. Por lo tanto, podemos ver en el mapa anterior que el potencial hidráulico está por encima de lo que se presenta en las regiones de clima tropical y en las regiones montañosas, con un potencial muy limitado o nulo en las zonas desérticas. Aunque está presente en una gran superficie mundial, la mayoría de las veces se asocia a un bajo potencial de producción de energía. En general, podemos ver que la mayoría de las grandes economías presentan aplicaciones potenciales de energía hidroeléctrica, con diferentes grados de potencial de producción. Por lo tanto, mientras que la mayoría puede confiar en la energía hidroeléctrica para respaldar otra fuente de energía renovable o para ser una parte significativa de su combinación energética, algunos otros pueden utilizarla como su principal fuente de energía. Como ejemplo de esta última aplicación, Indonesia, duodécimo consumidor de energía, presenta un potencial muy prometedor para la energía

²⁸ En los proyectos hidroeléctricos, la fiabilidad del caudal representa la consistencia de la disponibilidad de agua en la superficie cubierta de agua estudiada. Una mayor fiabilidad de caudal se entiende como una disponibilidad constante, mientras que una fiabilidad baja implica agua impredecible o intermitente.

hidroeléctrica, con amplias regiones sombreadas de verde a azul, lo que significa que los proyectos en esas zonas tienen un potencial energético superior a un TWh/año.

En total, de los 4 mapas - figura 11 para la energía geotérmica, figura 28 para la energía hidroeléctrica y anexo G para las energías eólica y solar- podemos ver que todos los países presentan potencial para diferentes fuentes de energías renovables, no hay ningún país que no pueda explotar al menos una fuente de energía renovable, mientras que la mayoría tiene varias opciones de energías renovables para ellos. Esto se aplica a la Argentina también.

Por lo tanto, el primer paso para Argentina es disponer de un sistema de producción de electricidad totalmente renovable, antes de emprender una electrificación masiva de su economía para sustituir el consumo de combustibles fósiles en sectores como el transporte o la industria. Para ello, necesita construir una capacidad renovable adicional suficiente para cubrir los 94,53 TWh restantes de demanda anual de electricidad, que también puede escribirse en J, es decir, 0,356 PJ.

Siguiendo el método utilizado en la primera sección de este proyecto, podemos evaluar tanto el potencial hidroeléctrico como el geotérmico de Argentina, observando los mapas que se presentan en las figuras 11 y 28. Podemos ver en la figura 11 que Argentina tiene un potencial geotérmico extendido hasta sus fronteras occidentales con Chile en la cordillera de los Andes, en particular en la región de Mendoza y en el extremo sur de la Patagonia y Tierra del Fuego. En esta última región se localiza el potencial hidroeléctrico, con también importantes recursos hidráulicos en la parte montañosa de la Patagonia. Por otro lado, el potencial eólico de Argentina es prometedor, particularmente en su costa atlántica y muy prometedor en el sur del país, con vientos medios de más de 20 m/s (Global Wind Atlas, 2023). Por otro lado, existe un prometedor potencial solar fotovoltaico al norte del país en su frontera con Chile y Bolivia, en las altas planicies de la cordillera de los Andes (Global Solar Atlas, 2023). Esto coincide con las ubicaciones de las capacidades ya instalada en el país como se observó antes en este proyecto de tesis. Además, estas provincias en las que se pueden implantar las capacidades ofrecen mucho espacio terrestre con poca población, por lo que son perfectamente adecuadas para la implantación de proyectos de energías renovables, como la solar o la eólica, que a veces pueden resultar problemáticos por cuestiones de cobertura del suelo.

En conjunto, podemos ver que existe un potencial prometedor para las energías renovables de todo tipo en Argentina, en particular en sus regiones montañosas y en el sur del país. Sin embargo, es importante señalar que la demanda de energía procede de las zonas más pobladas, que a menudo se encuentran lejos de las zonas montañosas del país y de la Patagonia. Este problema de lejanía, también observado en la sección anterior, se abordará en las próximas partes. Por lo tanto, Argentina ilustra

que se puede encontrar una combinación de energías renovables para los países consumidores de energía a gran escala, con algunas regiones de sus países que ofrecen un entorno muy prometedor para diversas fuentes de energía renovable.

Por estas razones evocadas encima, la Argentina ensena un contexto natural muy prometedor para las energías renovables.

Recursos en materias primas y lugares de implementación

Los recursos primarios, como se ha visto en los párrafos anteriores, pueden ser vinculantes para la implantación a gran escala de las energías renovables. Por lo tanto, se ha debatido que, para la aplicación a gran escala de las energías renovables, se requerirían estrategias de gestión y reciclaje de recursos con el fin de satisfacer la creciente demanda de materiales escasos. Esto se describe con más detalle en Yla-Mella y Pongracz (2016), que estudian el caso de un material escaso, el indio, que se utiliza en la fabricación de algunos dispositivos solares fotovoltaicos. Aunque el documento no contradice la implantación a gran escala de las energías renovables, sí argumenta que tal objetivo tendría que venir acompañado de algunas estrategias claras de gestión de los recursos. De entre estas estrategias, los autores sostienen que el reciclaje no es el único remedio para los recursos que se agotan, sino más bien tener una estrategia global que también tenga en cuenta los usos del material en un primer momento, y su posible reutilización al fabricar el dispositivo.

Por lo tanto, las cuestiones relativas a los recursos primarios deben considerarse de antemano, como ilustra el caso del indio, para una estrategia de gestión global de los recursos más eficiente, que comience antes del uso del propio recurso para garantizar su disponibilidad a lo largo del tiempo. Esto también debe ir unido a una estrategia más amplia sobre la infraestructura que se va a desplegar, con respecto a la combinación de energía seleccionada -como hemos visto, la mayoría de los países poseen diversos potenciales de energía renovable- y el propio dispositivo, que a menudo puede fabricarse con diferentes materiales, como por ejemplo los dispositivos fotovoltaicos solares.

Por otro lado, como en el caso de Argentina, las zonas prometedoras para las energías renovables suelen estar situadas en lugares alejados del centro de demanda energética. Por otra parte, la ubicación también puede ser un problema si está demasiado cerca de las zonas pobladas, ya que requeriría la aceptación de la población local que a menudo es reacia a tener este tipo de infraestructuras cerca de sus hogares. Sin embargo, en el caso de la última cuestión, esto podría superarse por la disminución resultante de los precios de la energía, como se vio en la parte donde se

discutió el LCOE, con las energías renovables mostrando menores costes de energía que por lo tanto beneficiarán a la población local que estaría más dispuesta a aceptarlas. Otro argumento a favor de la implantación es la estabilidad de estos precios, como se vio en el ejemplo de la consistencia de los precios de la electricidad en Islandia frente a los de Polonia.

Para resolver el problema de la lejanía, se están desarrollando tecnologías de líneas de transmisión de corriente continua de extra alta tensión (HVDC), que presentan la ventaja de transportar energía a grandes distancias con menos pérdidas de energía. En China, hay más de 20 líneas que conectan las zonas occidentales del país, donde se produce la energía, con las orientales y sudorientales, polos económicos y, por tanto, de demanda energética. Estas líneas, de una longitud media de 1 650 km por línea, y con una longitud máxima de 3 300 km, permiten conectar la oferta y la demanda de electricidad del país, con la menor pérdida de energía por el camino. Estas líneas aguantan una potencia de 400 000 Volts. Dichas infraestructuras presentan también la ventaja de incorporar una electrónica de potencia de nuevo desarrollo que controla la velocidad y el rendimiento de las líneas de transmisión, al tiempo que utilizan menos materiales, con las ventajas financieras y ergonómicas que ello conlleva (Sun et al., 2017).

Por lo tanto, es posible implantar energías renovables a gran escala, pero es necesario combinarlas con estrategias de gestión de recursos y sistemas de transmisión de electricidad eficientes, como el que se ha implantado en China con las líneas de transmisión HVDC.

Volviendo al ejemplo de Argentina, hemos visto en el apartado de recursos de la sección anterior que Argentina posee amplias reservas de litio. Esto forma parte de otra cartera de recursos naturales presentes en el suelo del país, entre los que también identificamos hierro, sílice, flúor, bario, caolín o bentonita que también pueden utilizarse en infraestructuras de energías renovables. Además, los importantes recursos en un mineral también pueden otorgar a Argentina un poder de negociación para acceder a otro recurso. Esta misma lógica puede aplicarse a otro país con importantes necesidades energéticas.

Por otro lado, en lo que respecta a la lejanía de las energías renovables, Buenos Aires, que concentra la mayor parte de la demanda de energía, se encuentra a unos 1.100 km de la cordillera de los Andes, donde la energía geotérmica alcanza su mayor potencial, o a unos 2.500 km de las zonas meridionales de la Patagonia, donde el potencial eólico o hidroeléctrico se encuentra en su punto más alto. Como resultado, Buenos Aires, y en última instancia la mayor parte de la demanda de energía de Argentina podría conectarse eficazmente a las zonas de producción de electricidad. Por ahora, el país está siendo cubierto por líneas de alta tensión de entre 132 y 220 kV de capacidad. Y dichas líneas se están

descomponiendo en distancias de los tan 500km (Secretaría de Energía, 2023). La implementación de las larguísimas líneas de transmisión existentes en China permitiría conectar, por ejemplo, las zonas del sur del país productoras de energía eólica con la región este de Buenos Aires con mayor demanda.

Uso, actividad económica y electrificación

Según los países, el consumo de energía varía de un sector a otro. Como se ve en los ejemplos de Costa Rica e Islandia, las principales áreas de consumo energético de combustibles fósiles son el transporte y las aplicaciones industriales. Lo mismo ocurre en todo el mundo, y se explica por las diferencias en las densidades energéticas.

Por lo tanto, una vez que un país consigue una producción de electricidad totalmente renovable, tiene que electrificar sus sectores del transporte y la industria para depender únicamente de fuentes de energía renovables.

En cuanto al sector del transporte en primer lugar, se ha comprobado que es factible pasarlo en su totalidad a medios de transporte alimentados por energías no carbonizadas. Así, la mayoría de los vehículos de transporte, incluidos los de flota ligera, los camiones de gran tonelaje o los buques de transporte marítimo, funcionarán con baterías, mientras que el transporte aéreo estará respaldado por una combustión de metano pensada para sustituir al queroseno en los aviones. Los resultados de esta investigación demuestran que es factible y viable pasar a un sector del transporte totalmente no carbonizado y renovable. Además, los resultados mostraron que dicha economía 100% renovable creará una reducción del 18% en la demanda de energía, que proviene principalmente de una gran reducción en la demanda de energía del transporte por carretera que compensa el aumento de la demanda en el transporte marítimo y aéreo (García-Olivares et al., 2018).

Sin embargo, esto implica pasar de medios de transporte impulsados por petróleo a medios de transporte impulsados por electricidad o biogás. Aunque los nuevos combustibles de biogás e hidrógeno quedan fuera del ámbito de este estudio y están más destinados al transporte aéreo, el argumento se basaría en el transporte terrestre. Los resultados anteriores se analizarán en función de las infraestructuras actuales del país. De hecho, el estudio se realiza a nivel global, con países como los europeos que ya cuentan con infraestructuras de movilidad verde. Dichas infraestructuras incluyen los medios de transporte eléctrico urbano que son el tranvía, el metro o el autobús eléctrico, así como los trenes de cercanías y los trenes de alta velocidad, hasta los sistemas de reparto eléctrico. Por otro lado, este podría no ser el caso de Argentina, con un menor número de infraestructuras ferroviarias o

líneas de metro en las ciudades más grandes. En consecuencia, la electrificación del sector del transporte en Argentina puede suponer un reto mayor que en otros países, con costes probablemente más elevados, pero a cambio puede conllevar mayores oportunidades y creación de empleo.

Por otro lado, la aplicación industrial de las energías renovables puede realizarse a través de diversas tecnologías. En primer lugar, la electricidad directa producida por energías renovables puede utilizarse para alimentar maquinaria industrial, para refrigeración eléctrica y para calefacción. Además, los biocombustibles y la biomasa pueden utilizarse para sustituir al gas natural, muy utilizado en la industria pesada para fines de fundición. También se puede crear hidrógeno a partir de fuentes de energía renovables, como la energía eólica, mediante la electrólisis del agua, que en lo sucesivo también puede servir como biocombustible para fines de fusión y ebullición. Además, se ha comprobado que la electricidad puede utilizarse para la industria ligera o la industria de motores de servicio. Sin embargo, las aplicaciones de la electricidad son limitadas para la industria pesada y las nuevas tecnologías para utilizar la electricidad para tales tareas son por ahora bastante más caras que el uso de combustibles fósiles (Gielen et al., 2019). Por lo tanto, los biocombustibles y el hidrógeno son más útiles en algunas aplicaciones industriales y la electricidad renovable se utilizaría para producir hidrógeno en lugar de aplicarse directamente al proceso industrial. Además, mediante la electrólisis del agua, podemos crear hidrógeno verde que, en última instancia, puede utilizarse como combustible comparable al gas natural en procesos industriales.

Por ejemplo, Islandia ha conseguido eliminar todos los combustibles fósiles de sus prácticas industriales y ahora depende casi exclusivamente de fuentes de energía renovables. De hecho, los procesos industriales que antes se alimentaban de la combustión de carbón se realizan ahora utilizando electricidad y calor procedentes de fuentes de energía renovables, en particular la energía geotérmica.

Así, se ha visto que las energías renovables pueden tener aplicaciones a gran escala tanto en el ámbito industrial como en el del transporte, para las distintas aplicaciones industriales. En el uso residencial, mediante calefacción eléctrica o bomba de calor, se ha demostrado que casi todos los usos pueden cubrirse con la aplicación de energías renovables. Por último, casi se ha logrado un sistema totalmente eléctrico, en el contexto de Tílos, Costa Rica o Islandia, por ejemplo, y se cree que es alcanzable para todos los países, independientemente de cuánto consuman, mediante la ampliación de las infraestructuras de energías renovables.

Volviendo al caso de la Argentina se estudia cómo se puede ampliar la producción de energía renovable. En la actualidad, el país se abastece principalmente de combustibles fósiles, en particular

petróleo y gas natural. En total, Argentina necesitará una capacidad adicional de 1 926 PJ de energías renovables, lo que puede expresarse como 553 TWh para pasar completamente a las energías renovables. Esto se hace suponiendo que las ganancias de eficiencia energética derivadas de la aplicación de energías renovables, que están vinculadas a través de la eficiencia en la conversión de energía y los sistemas de medición inteligentes acoplados a las infraestructuras de energías renovables, se equilibrarán con la disminución de la eficiencia en algunas otras aplicaciones, como la necesidad de producir hidrógeno para fines industriales. Esta cantidad de electricidad es más de 4 veces superior a la que se produce realmente en Argentina, con 94,53 TWh adicionales que se producen con combustibles fósiles que deben desplazarse. Por lo tanto, requiere una seria adaptación a la potencia del país, con importantes inversiones en líneas de transmisión, convertidores y sistemas de distribución.

Para conseguir este importantísimo aumento de electricidad, se van a implantar energías renovables, y como hemos visto anteriormente, los cuatro tipos de energías renovables se pueden implantar en Argentina gracias a su variedad de características geográficas. Como resultado, elaboraríamos un mix energético de varias fuentes de energías renovables. El objetivo es cubrir el aumento de 647,53 TWh de electricidad producida anualmente, con un 20% de energía geotérmica, un 20% de energía hidroeléctrica y un 30% de cada una de las energías eólica y solar. La justificación de esa elección se explica por los elevados costes asociados a la energía geotérmica y a la energía hidroeléctrica, que sin embargo es importante incluir, ya que hemos visto su importancia en países con una producción de electricidad casi totalmente renovable basada más en la energía geotérmica (Islandia) y en la hidroeléctrica (Costa Rica).

10. **Energía geotérmica:** utilizando el ejemplo de Islandia, que tenía ocho plantas en funcionamiento, con una capacidad de 755 MWe que produjeron en 2020 6 010 GWh (Huttrer, 2021). Por lo tanto, para cubrir unos 126 TWh de producción anual, Argentina necesitaría implementar una red de infraestructura geotérmica por un factor de 21 la capacidad instalada de Islandia. Ello requeriría importantes costes iniciales, si se considera que el proyecto es viable. Es importante tener en cuenta que la energía geotérmica no sólo produce electricidad, sino también calor, que puede utilizarse directamente con un rendimiento superior al de la electricidad, que se convertiría después en calor, lo que reduciría las necesidades de aumento de electricidad.
11. **Energía hidroeléctrica:** tomando el ejemplo de Costa Rica, con una capacidad total instalada de 1 843 MW para una producción anual de unos 6 720 GWh (Andritz, 2023). Por lo tanto, será

necesario implementar una red hidroeléctrica 19 veces mayor para cubrir el 20% de las necesidades de electricidad resultantes de una electrificación masiva de Argentina.

12. **Energía eólica:** tomaremos el ejemplo de Tilos, utilizando parques eólicos de 20 aerogeneradores como en el caso de Tilos, con una capacidad nominal de 800 kW, lo que hace que el parque tenga una capacidad total de 16 MW. Suponiendo una producción del 20-40%, como en un documento citado anteriormente, eso implica una producción del parque de 3,2 - 6,4 MWh. Por lo tanto, se necesitarán entre 80 000 y 41 000 de estos parques, según la idoneidad del emplazamiento, para cubrir el 40% de las necesidades de electricidad.
13. **Energía solar:** por último, para la energía solar fotovoltaica, utilizaremos como punto de base el mayor proyecto solar fotovoltaico de Argentina, el proyecto Cauchari Solar, en la región, con una capacidad instalada de 300 MW y por instalar de 200 MW, para alcanzar una producción neta de aproximadamente 660 GWh + 440 GWh por venir al año. El proyecto tuvo un coste nominal de 390 millones de euros y está situado en la región noroeste del país, en la región de Jujuy, a una altitud de 4.020 metros sobre el nivel del mar (NS Energy, 2023). Por lo tanto, para que las energías solares cubran los 259 TWh restantes de electricidad adicional necesaria, harían falta 235 parques solares como el de Cauchari, que se implantarían en las zonas adecuadas con alto potencial solar fotovoltaico.

Por lo tanto, podemos ver que, si bien es técnicamente factible implantar un sistema energético totalmente renovable, requiere una electrificación global de la economía, pero, sobre todo, un despliegue masivo de proyectos de energías renovables, que a menudo representa más de 200 veces lo que hay instalado actualmente en algunos países, y que sin duda requerirá una parte importante de recursos y terrenos.

Viabilidad financiera de la transición

Una vez que las condiciones necesarias para esta transición sean reunidas en términos de mix energético apropiado, de disponibilidad en materias primas y de adaptación a los varios usos y a la actividad económica de un país, se necesita determinar la viabilidad financiera de un proyecto así. A este fin, se condujo la entrevista de Lucas Stravato, analista en financiación y estructuración de proyectos de energías renovables para CVE – “Changeons Notre Vision de l'Energie”. La empresa se dedica a la producción de electricidad verde mediante unidades fotovoltaicas, así como a infraestructuras de bio CH₄ e hidrógeno verde²⁹. La función del Sr. Stravato consiste en estimar la rentabilidad y, por tanto, la viabilidad comercial de los proyectos de energías renovables de CVE, razón por la cual se le preguntó por la viabilidad económica y financiera de una economía de energías renovables. La entrevista puede leerse a continuación:

--- Inicio entrevista Lucas Stravato ---

¿Cuáles son los principales retos a los que se enfrentan los países que intentan alcanzar una producción de electricidad 100% renovable?

El principal reto son las medidas políticas y los recursos que se ponen a disposición para alcanzar los objetivos preestablecidos. Por ejemplo, el sector de la energía solar no era en absoluto rentable al principio, por lo que fue fuertemente subvencionado mediante la introducción de tarifas ventajosas. Esta subvención permitió garantizar una tarifa fija de venta de electricidad a largo plazo para asegurar la rentabilidad de los proyectos, permitiéndoles planificar unos ingresos fijos durante los primeros años del proyecto para garantizar el reembolso de los principales costes de instalación del proyecto. Esto significaba que, al principio de la industria, los proyectos con CAPEX³⁰ demasiado elevados en relación con sus rendimientos de explotación, combinados con los precios previstos de la electricidad, podían financiarse gracias a las tarifas preferenciales ofrecidas por el Estado, que inicialmente eran superiores a los precios de mercado. Ahora que la industria solar ha alcanzado la madurez, el Estado ya no necesita ofrecer esas tarifas ventajosas, que han bajado, pero el CAPEX también se ha reducido. La reducción del CAPEX se debe a la mejora de los módulos fotovoltaicos y a la reducción de los costes de producción a medida que crece la industria.

²⁹ Bio CH₄ y hidrogeno verde son dos biocarburantes obtenidos por el primeros a partir de residuos agrícolas y el otro a partir de la electrolisis de lagua.

³⁰ El CAPEX viene del inglés “Capital Expenditure” y corresponde al capital invertido al principio de un proyecto para su establecimiento.

Por lo demás, el Estado francés sigue invirtiendo en subvenciones para energías renovables que aún no están maduras, como el hidrógeno verde, con el fin de apoyar la fase de crecimiento de la industria, cuando aún no es rentable, hasta que llegue a serlo por sí misma.

¿Podemos decir, entonces, que en un proceso de aumento de las infraestructuras de energías renovables, las subvenciones estatales disminuyen a medida que la industria madura?

Por supuesto, es un círculo virtuoso el que se abre para un gobierno que empieza a invertir en infraestructuras de energías renovables, porque su inversión temprana en estas infraestructuras permite que la industria crezca, lo que a su vez crea una mayor rentabilidad para esta industria, que por tanto necesita menos ayudas estatales. El Estado se beneficia entonces de las repercusiones directas e indirectas del crecimiento de la industria. Entre ellos, la creación de empleo y la estabilidad de los precios de la electricidad.

Por ejemplo, el conflicto que vive Ucrania desde principios de 2022 ha demostrado la exposición de un país a factores macroeconómicos vinculados al coste de las materias primas. Por otro lado, el precio de la energía renovable, con su tarifa fija durante periodos como 20 años, garantiza la estabilidad y, en el caso de la guerra en Ucrania, ha permitido obtener ganancias reales cuando la tarifa puede haber sido mucho más baja que los precios al contado³¹ durante los periodos de mayor agitación comercial internacional.

Otra externalidad positiva son los impuestos locales sobre las infraestructuras energéticas, que corresponden a impuestos sobre los ingresos de una empresa que produce energía localmente, en lugar de traer energía de otro país que se beneficiaría de los efectos financieros derivados de la actividad económica.

En su opinión, ¿podría ampliarse la industria de las energías renovables, mediante una combinación de distintas fuentes, para cubrir todas nuestras necesidades actuales de electricidad?

Esto es algo posible y hacia lo que estamos avanzando en Francia, con un aumento deliberado y observado de las infraestructuras de energías renovables eólica y solar. Debido al carácter intermitente de energías renovables como la eólica y la solar, sería necesaria una mezcla de ambas. También sería necesaria una mezcla con energía nuclear, ya que la energía nuclear también es una fuente de energía extremadamente baja en carbono, si no prácticamente nula. La energía eólica y la solar juntas tendrían

³¹ Precios al contado o precios “spot” son precios que resulten de los mercados de la electricidad, según las ofertas, las demandas y las actividades de especulación alrededor de estos precios.

dificultades para cubrir nuestras necesidades de electricidad, y necesitaríamos el apoyo de una forma de electricidad controlable con bajas emisiones de carbono, como la energía nuclear.

En términos de combinación, para un país como Francia, la combinación se basaría en gran medida en la energía eólica, con el apoyo de la energía solar, y la energía nuclear al 50%. Además, estas combinaciones dependen sobre todo de las características climáticas y geográficas de los países y regiones en cuestión. El 50% también podría cubrirse con energías renovables geotérmicas o hidráulicas, según el ponente, pero no se considera especialista en estos ámbitos y prefiere no hacer recomendaciones directas.

Estando implicado en la financiación de proyectos de energías renovables y, por tanto, conocedor de las condiciones económicas que requiere este tipo de inversión, ¿es financieramente viable y realista el paso a una economía basada exclusivamente en las energías renovables?

Financieramente, es factible en la medida en que la filial atrae cada vez a más inversores y, por tanto, el sector es cada vez más rentable. Este es actualmente el caso de Francia, donde la filial solar atrae cada vez más inversiones del sector privado. Los bancos también están muy dispuestos a conceder préstamos, gracias a la seguridad de ingresos que proporcionan las tarifas vigentes y a la relativa precisión de la producción de electricidad a lo largo de la vida del proyecto. Según el entrevistado, en Francia el sector no depende de la financiación, que es relativamente accesible. Lo que falta son proyectos fáciles de financiar.

A modo de ejemplo, los promotores franceses de energías renovables han podido obtener fondos importantes en los últimos años, gracias al atractivo del sector desde el punto de vista de los inversores exteriores.

En cuanto a la electrificación de la economía, ¿qué factores impulsarían una electrificación masiva de la economía y la industria en particular, y cuál sería el impacto económico de tal medida?

En lo que respecta al sector residencial, la tracción procede esencialmente del Estado y de las medidas que está tomando para obligar a los propietarios de viviendas a pasar a métodos de consumo de energía verde. Nos referimos a la calefacción mediante bombas de calor o electricidad verde, o a las redes de gas sin carbono, como el hidrógeno verde.

En cuanto a la industria, la principal preocupación de los fabricantes es tener una garantía sobre el coste de la electricidad. Para ello, también se benefician de tarifas fijas para las energías renovables

en Francia, conocidas como PPA32, con el fin de garantizar la estabilidad de los precios de sus operaciones. El razonamiento subyacente es, en primer lugar, obtener estabilidad en el precio de la electricidad y, en segundo lugar, poder convencer a los fabricantes de que adapten sus prácticas al uso de la electricidad. En el contexto de la guerra en Ucrania, por ejemplo, tener precios fijos de la electricidad significa no depender del precio de las materias primas y, por tanto, tener una mejor visibilidad de los costes a largo plazo de la empresa.

Por último, ¿pueden las ganancias obtenidas por la transición a las energías renovables compensar los costes, tanto de la propia infraestructura como de las subvenciones generadas por esta transición?

En primer lugar, hay que tener en cuenta también los costes de mantenimiento de las infraestructuras instaladas. En este tipo de razonamiento, no debemos basarnos exclusivamente en los costes de instalación y puesta en marcha, sino incluir también los costes de explotación de este tipo de infraestructuras.

Sin embargo, con un horizonte a largo plazo, esta transición presenta importantes fuentes de beneficios para una economía. Entre ellas figuran los beneficios fiscales, la creación de empleo, la actividad económica en el país donde se instala la infraestructura y, por último, la garantía de precios estables de la electricidad.

Otro factor importante es la creciente madurez de los distintos sectores de las energías renovables. En efecto, a medida que aumenten las inversiones en las distintas filiales de energías renovables, los costes de implantación irán disminuyendo progresivamente, mientras que los beneficios seguirán siendo los mismos, por lo que es muy probable que los beneficios a largo plazo de esta transición cubran los costes iniciales incurridos.

--- Fin entrevista Lucas Stravato ---

La entrevista proporciona valiosas conclusiones sobre la escalabilidad de las energías renovables y su relación con la mejora global de las industrias de producción de energía renovable. Uno de los principales retos para los países que buscan alcanzar una producción de electricidad 100% renovable es la formulación de políticas y la asignación de recursos adecuados para lograr sus objetivos.

32 PPA viene del inglés “Price Purchase Agreement”, son contratos de suministro a largo plazo de energía renovable a empresas. Garantizan que una determinada cantidad de la energía que consumen procede de la producción de energías renovables.

Históricamente, la subvención inicial desempeñó un papel fundamental al garantizar tarifas ventajosas y estabilidad a largo plazo para los proyectos de energía solar, lo que permitió su crecimiento y madurez. A medida que la industria ha avanzado, las subvenciones estatales han disminuido, pero el costo de instalación también ha bajado, lo que demuestra que la inversión temprana es clave para el desarrollo de la industria.

La combinación de fuentes de energía renovable, como la eólica y la solar, es vista como una estrategia realista para cubrir las necesidades actuales de electricidad. La intermitencia de las energías renovables hace necesario contar con fuentes de energía controlables y bajas en carbono, como la nuclear. La combinación específica dependerá de las condiciones climáticas y geográficas de cada región. Esto demuestra que la transición hacia una matriz energética renovable es viable desde una perspectiva técnica.

En términos financieros, la entrevista subraya que la viabilidad de una economía basada exclusivamente en energías renovables depende del atractivo que el sector representa para los inversores privados. En el caso de Francia, el sector solar ha atraído inversiones significativas, y los bancos están dispuestos a proporcionar préstamos debido a la seguridad de ingresos que ofrecen las tarifas fijas. La transición a energías renovables también conlleva beneficios fiscales, creación de empleo y estabilidad en los precios de la electricidad, lo que puede contribuir a compensar los costos iniciales y de mantenimiento.

Aplicando estas conclusiones a Argentina, puede observarse que, al encontrarse en la fase inicial de su ciclo de vida, las energías renovables en Argentina necesitarán el apoyo de acciones gubernamentales, como subvenciones o tarifas beneficiosas para el desarrollador de energías renovables. Sin embargo, se cree que esta inversión inicial será beneficiosa para el país a largo plazo, ya que dependerá menos de otros países en materia energética y desarrollará su industria nacional.

Presupuesto y condiciones económicas

Como se ha visto anteriormente, Jacobson et al (2022) descubrieron que costaría 61,5 billones de USD desplegar estructuras de energías renovables en 145 países, lo que para que equivalga a 2/3 de la producción económica bruta mundial de 2022. Esto se explica por la inversión masiva que hay que realizar en nuevas infraestructuras de energías renovables que será el caso por la Argentina que cuenta actualmente con menos del 20% de la producción de electricidad y calor provenientes de fuentes renovables mientras esas tienen una contribución inferior al 15% en el suministro total de energía.

Aparte de la inversión en la propia infraestructura, ésta lleva aparejados los costes de adaptación del conjunto de la economía a un contexto favorable a las energías renovables. Por consiguiente, es necesario electrificar el conjunto de la economía, como se ha señalado anteriormente, y adaptar la red eléctrica al aumento masivo de los flujos de electricidad.

En cuanto al cambio a las energías renovables en el sector del transporte, García-Olivares et al. (2018) identificaron que este cambio ascenderá a un total de 39 billones de USD en 2016, lo que representa el 33 % del PIB mundial en ese momento. Sin embargo, el mismo documento sostiene que si estos costes se distribuyeran a lo largo de los próximos 30 años, se necesitaría un total del 1,1 % del PIB mundial al año para lograr la plena neutralidad de la industria del transporte.

Por otro lado, para el sector industrial representa también un cambio masivo con grandes costes asociados, para la adaptación a gran escala de todos los procesos industriales, incluyendo la industria pesada, las actividades de ebullición o fusión. Aunque no existe una cifra concreta para los costes asociados a este cambio, el paso a las energías renovables en el contexto del sector industrial sí supone un aumento significativo de los costes asociados a las actividades industriales debido a la necesidad de invertir en nuevas infraestructuras adaptadas a un nuevo combustible limpio o a la electrificación del proceso (Sorknaes et al., 2022). Sin embargo, se ha comprobado que dicho cambio supone una reducción de costes para dichos procesos industriales, generada por la reducción de los costes energéticos gracias al menor LCOE de las energías renovables (Bogdanov et al., 2021).

De ahí que el cambio hacia las energías renovables conlleve grandes costes iniciales, tanto para el despliegue de la infraestructura de producción de energía como para las infraestructuras resultantes que deben construirse para dicha transición. En la isla de Tilos, los costes iniciales del proyecto fueron de 14 millones de euros sólo para 500 personas, lo que representa un coste de 28 000 euros/habitante³³. Por otra parte, el proyecto de la presa de Reventazón en Costa Rica, con una capacidad de 305,5 MW, tuvo un coste de 1 400 millones de USD y una producción anual estimada de 1 400 GWh, lo que representa el 10% de la energía que se espera producir a nivel nacional para entonces (IFC, 2012). Cruzando los datos, se puede estimar que este proyecto tuvo un coste per cápita de 2 700 \$/capita³⁴. Aplicando tales costes per cápita a Argentina, proporcionaría un coste que oscilaría entre 122,5 bn USD y hasta 1 361,4 bn USD. A modo de comparación, el PIB de Argentina en

33 Suponemos un tipo de cambio que hace 28 EUR = 30 USD.

34 Si el 10% de la energía del país es producida por este proyecto, podemos extrapolar y estimar que afecta al 10% de la población por lo que $10\% * 5,16m = 516\ 000$ habitantes. A continuación, dividimos el coste del proyecto por el número de personas calculado anteriormente.

2015 fue de 558.180 millones de dólares, lo que significa que dicha inversión oscilará entre el 21,9% y el 243,9% del PIB anual del país. Es importante señalar que estos costes varían mucho y que en este apartado se ha adoptado un punto de vista poblacional, porque se quiere entender los costes para un gobierno desde el punto de vista poblacional, mientras que normalmente es más relevante calcular el coste por unidad de energía producida. Se adopta este punto de vista para ofrecer una comparación con el gasto público. También se puede señalar que la importante parte del PIB presentada en el cálculo se debe al relativamente bajo PIB per cápita de Argentina (que ocupa el puesto 65 en el mundo) y al hecho de que este cálculo no tiene en cuenta la infraestructura de energías renovables ya instalada.

Según el informe Perspectivas 2022 de la IEA (página 83) ya mencionado en el transcurso de este proyecto, el gasto público total destinado a energías limpias ascendió a 1,1 billones de USD en 2021, tras la crisis de Covid. Esto representa un 1,14% de la producción económica mundial del mismo año. A modo de comparación, Argentina se comprometió a invertir 86.000 millones de dólares en el desarrollo de energías renovables hasta 2030 (Koop, 2023), lo que representa el 15,4% de su PIB anual. Por lo tanto, se puede ver que una cantidad significativa de la producción anual se está dedicando a la transición hacia la energía limpia. Además, esas promesas de inversión son a corto plazo, mientras que en el documento de García-Olivares et al. (2018) se ha visto que los elevados costes de inversión inicial en infraestructuras de energías renovables pueden sufragarse distribuyendo los costes a lo largo de los años. Como resultado, se puede ver que dicha transición es económicamente viable a gran escala, cuando se tiene un plan claro a largo plazo.

Además, es importante señalar que, dado que los proyectos de energías renovables conllevan grandes costes de ejecución, esto tiene un gran impacto en la financiación del proyecto por parte de empresas privadas y en las condiciones de los préstamos concedidos. Egli et al. (2018) descubrieron, a través de pruebas empíricas de proyectos eólicos y solares en Alemania, que estas condiciones financieras han mejorado en gran medida, debido a las condiciones económicas, que están impulsadas principalmente por los tipos de interés, y por el aprendizaje cada vez mayor de la industria. Esto también es el resultado de las crecientes implicaciones de los gobiernos que hacen que el sector sea más prometedor para atraer inversiones. Esto respalda aún más que las estrategias a largo plazo para la implantación a gran escala de las energías renovables son viables, ya que el sector presenta un contexto empresarial cada vez mejor. Sin embargo, es importante señalar que algunos países podrían tener condiciones de crédito bastante difíciles, como Argentina, donde la importante inflación podría afectar a la decisión de financiación, ya que se tiene en cuenta en gran medida para los proyectos con altos costes iniciales.

Resumen del tercer capítulo

A lo largo de esta sección, se ha visto que, si bien presenta importantes desafíos, la implementación a gran escala de las energías renovables es técnicamente factible a través de estrategias de largo plazo y un exhaustivo análisis de las condiciones naturales para la determinación del mix energético adecuado.

Utilizando el ejemplo de Argentina, que presenta el 31º consumo energético mundial, se ha visto que dicha transición requeriría una inversión y un despliegue de infraestructuras sin precedentes para cubrir el combustible fósil sustituido, con una importante cantidad de presupuesto que dedicar a dicha transición. Esta implementación también vendrá acompañada de una amplia planificación de la gestión de los recursos, que acompañará al plan del sistema energético.

Sin embargo, se ha visto que las energías renovables también permiten reducir costes a largo plazo, lo que compensaría en última instancia los costes iniciales incurridos, además de tener otras externalidades positivas para la sociedad en su conjunto.

CONCLUSION

A lo largo de este proyecto se ha analizado argumentos sobre la aplicabilidad y la ampliación de las energías renovables al contexto de la Argentina. El objetivo de este estudio era comprender como se podía aplicar más extensivamente las energías renovables en Argentina a partir de la información que tenemos de tres casos de escalas diferentes donde dependen altamente en energías renovables.

Actualmente, las energías renovables contribuyen a solo un poco más de 20% de la producción de energía global. En Argentina, esta cifra baja a solo 8%. En línea con la ambición de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero para 2050, las emisiones causadas por el sistema energético deben reducirse drásticamente, y esto se piensa hacer confiando cada vez más en las energías renovables. Por lo tanto, Argentina necesita elaborar un plan para aumentar su producción de energía renovable. Esto puede hacerse observando lo que se ha hecho con éxito en otros países.

La isla de Tilos -un proyecto piloto de la Unión Europea para el desarrollo de energías renovables en zonas remotas- se utilizó en primer lugar para mostrar el potencial de las energías renovables, la eólica principalmente en ese caso con una pequeña unidad de energía solar, como solución sostenible para comunidades remotas y dependientes de la energía. Pasando a un escenario a media escala, se examinó el panorama energético de Islandia, como país poblado por menos de 500 000 habitantes y con el 120º consumo energético mundial. Los resultados de esa búsqueda muestran una importante utilización de los recursos geotérmicos e hidroeléctricos, que cubren casi todas las necesidades eléctricas, industriales y térmicas de la isla, mientras que sigue dependiendo de los combustibles fósiles para el transporte y las necesidades pesqueras.

Por último, el estudio explora Costa Rica que representa la escala la más grande del estudio sin ser de gran escala como definido tampoco, destacando los logros de la nación en el aprovechamiento de las energías renovables, predominantemente a partir de fuentes hidroeléctricas y eólicas, cubriendo casi todas las necesidades de electricidad, sin dejar de ser un gran consumidor de recursos de combustibles fósiles, sobre todo petróleo, utilizado principalmente en el sector del transporte.

A lo largo de la investigación, se ha analizado las ventajas y los retos asociados a la aplicabilidad de las energías renovables a diferentes escalas. Se ha examinado las consideraciones de coste, incluidas las inversiones iniciales y los ahorros a largo plazo, haciendo hincapié en la viabilidad económica de las soluciones basadas en energías renovables. Además, se ha destacado los numerosos beneficios medioambientales y sociales, como la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, la seguridad energética y la mejora indirecta de la atención sanitaria, que pueden derivarse de la transición a las energías renovables.

Sin embargo, es importante reconocer que existen retos y deficiencias, como el carácter intermitente de algunas fuentes renovables, la necesidad de soluciones de almacenamiento de energía y la complejidad de la transición desde los combustibles fósiles. El principal reto es la electrificación de la economía, y en particular en las áreas en las que se utilizan combustibles fósiles por sus ventajas comparativas en algunas características, como que el petróleo tiene una mayor densidad energética, lo que es especialmente relevante en el sector del transporte. Estos retos deben abordarse mediante una planificación estratégica, tecnologías innovadoras y políticas de apoyo.

Para determinar la aplicabilidad de las energías renovables a la Argentina se ha establecido criterios y condiciones, considerando factores como las condiciones naturales, la disponibilidad de recursos, la viabilidad económica y las necesidades de electrificación, partiendo de lo identificado en la implantación a gran escala de energías renovables en tres zonas estudiadas en la primera parte. Se ha encontrado que Argentina tiene un contexto natural favorable, con también recursos naturales importantes para las materias primas necesarias para las infraestructuras de energías renovables. Por otro lado, la aplicación de energías renovables al contexto de la Argentina puede enfrentarse a grandes desafíos económicos, con las condiciones económicas del país, y de electrificación de su país.

En resumen, esta tesis de máster ofrece una visión del potencial y los retos de la adopción de energías renovables al contexto de la Argentina, en una implantación a pequeña escala ya realizada y para una posible futura implantación a gran escala. Subraya la importancia de un futuro energético sostenible y el papel que las energías renovables pueden desempeñar en la consecución de ese objetivo. Como paso adelante, sería una gran contribución realizar el mismo estudio, mirando a través de las lentes de la empresa de energía que están tomando decisiones sobre la selección de energía, con el fin de tener un mayor enfoque en la consideración económica y financiera de dichas empresas que son las que finalmente llevan a cabo la inversión en este tipo de infraestructuras.

Referencias

Bibliografía

1. Bogdanov, D., Gulagi, A., Fasihi, M. y Breyer, C. (2021). Full energy sector transition towards 100% renewable energy supply: Integrating power, heat, transport and industry sectors including desalination. *Journal of Applied Energy*, vol 283. Disponible en : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261920316639#ab005>. (Acceso 03/09/2023, traducción propia)
2. Bomgardner, M. y Scott, A. (2018). Can we close the loop on old batteries, wind turbines, and solar panels to keep valuable materials out of the trash? *Journal of American Chemical Society*, vol 96 (15). Disponible en : <https://cen.acs.org/energy/renewables/Recycling-renewables/96/i15> (Acceso 01/09/2023, traducción propia)
3. Bragagnolo, J.A., Taretto, K. and Navntoft, C. (2022). Solar energy in Argentina. *Solar 2022*, vol 2 (2), pp 120-140. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2673-9941/2/2/8>. (Acceso 04/11/2023, traducción propia)
4. Burke, M. J. y Stephens, J. C. (2018). Political power and renewable energy futures: A critical review. *Journal of Energy Research and Social Science*, vol 35, pp 78-93. Disponible en : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214629617303468#abs0010> (Acceso 01/09/2023, traducción propia)
5. Coro, G. y Trumpy, E. (2020). Predicting geographical suitability of geothermal power plants. *Journal of Cleaner Production*, vol 267. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620319211>. (Acceso 04/08/2023, traducción propia)
6. Devoto, G. A. (2006). Hydroelectric power and development in Argentina. *Ente nacional regulador de la electricidad*. Disponible en: https://www.un.org/esa/sustdev/sdissues/energy/op/hydro_devoto.pdf (Acceso 04/11/2023, traducción propia)
7. Garcia-Olivares, A., Solé, J. y Osychenko, O. (2018). Transportation in a 100% renewable energy system. *Journal of Energy Conversion and Management*, vol 158 pp 266-285. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890417312050#s0065>. (Acceso 05/09/2023, traducción propia)
8. Gielen, D., Boshell, F., Saygin, D., Bazilian, M. D., Wagner, N. y Gorini, R. (2019). The role of renewable energy in the global energy transformation. *Journal of Energy Strategy Reviews*, vol 24, pp 38 – 50. Disponible en : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211467X19300082#bib46>. (Acceso 04/09/2023, traducción propia)

9. Gowrisankaran, G., Reynolds, S. S. y Samano, M. (2011). Intermittency and the value of renewable energy. *National Bureau of Economic Research*, documento 17 086, mayo 2011. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/228303570_Intermittency_and_the_Value_of_Renewable_Energy. (Acceso 14/08/2023, traducción propia)
10. Groscurth, H. M., Bruckner, T. y Kümmel, R. (1995). Modeling of energy-services supply systems. *Journal of Energy*, vol 20 (9), pp 941 – 958. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/036054429500067Q>. (Acceso 01/09/2023, traducción propia)
11. Hache, E., Barnet, C. y Seck, G. (2021). Lithium in the energy transition: more than a resource issue? *Metals in energy transition*, vol 4. Disponible en : <https://www.ifpenergiesnouvelles.com/article/lithium-energy-transition-more-resource-issue> (Acceso 01/09/2023, traducción propia)
12. Huenteler, J., Niebhur, C. y Schmidt, T. S. (2016). The effect of local and global learning on the cost of renewable energy in developing countries. *Journal of Cleaner Production*, vol 128 pp 6-21. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652614006441>. (Acceso 31/08/2023, traducción propia)
13. Jacobson, M., von Krauland, A., Coughlin, S. J., Dukas, E., Nelson, A. J. H., Palmer, C. S. y Rasmussen, K., R. (2022). Low-cost solutions to global warming, air pollution, and energy insecurity for 145 countries. *Journal of Energy & Environmental Science*, vol 15, pp 3343-3359. Disponible en: <https://web.stanford.edu/group/efmh/jacobson/Articles/I/145Country/22-145Countries.pdf> (Acceso 28/08/2023, traducción propia)
14. Kaldelis, J.K. y Zafirakis, D. (2020). Prospects and challenges for clean energy in European Islands. The Tilos paradigm. *Journal of Renewable Energy*, vol. 145, pp. 2489-2502. Disponible en : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148119312017>. (Acceso 29/06/2023, traducción propia)
15. Klimenko, V. V., Ratner, S. V. y Tereshin, A. G. (2021). Constraints imposed by key-material resources on renewable energy development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol 144. Disponible en : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032121003014>. (Acceso 30/08/2023, traducción propia)
16. Koppl, A. y Schratzenstaller, M. (2022). Carbon taxation: A review of the empirical literature. *Journal of Economic Surveys*, vol 37 (4) pp 1353 -1388. Disponible en : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/joes.12531>. (Acceso 29/08/2023, traducción propia)
17. Moreau, V., Dos Reis, P.C. y Vuille, F. (2019). Enough Metals? Resource Constraints to Supply a Fully Renewable Energy System. *Resources*, vol 8(1), pp 29. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2079-9276/8/1/29> (Acceso 01/09/2023, traducción propia)

18. Palmi , M., Parida, V., Mader, A. y Wincent, J. (2023). Clarifying the scaling concept: A review, definition, and measure of scaling performance and an elaborate agenda for future research. *Journal of Business Research*, vol 158. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0148296322010955>. (Acceso 15/10/2023, traducción propia)
19. Pehlken, A., Albach, S. y Vogt, T. (2017). Is there a resource constraint related to lithium ion batteries in cars? *The international journal of lifecycle assessment*, vol 22, pp 40-53. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11367-015-0925-4#citeas>. (Acceso 01/09/2023, traducción propia)
20. Shen, W., Chen, X., Qiu, J., Hayward, J. A., Sayeed, S., Osman, P., Meng K. y Yang Dong, Z. (2020). A comprehensive review of variable renewable energy leveled cost of electricity. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol 133. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S136403212030589X>. (Acceso 28/08/2023, traducción propia)
21. Sorknaes, P., Johannsen, R. M., Korberg, A. D., Nielsen, T. B., Petersen, U. R. y Mathiesen, B. V. (2022). Electrification of the industrial sector in 100% renewable energy scenarios. *Journal of Energy*, vol 254, parte B. Disponible en : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544222012427>. (Acceso 05/09/2023, traducción propia)
22. Sun, J., Li, M., Zhang, Z., Xu, T., He, J., Wang, H. y Li, G. (2017). Renewable energy transmission by HVDC across the continent: system challenges and opportunities. *Journal of Power and Energy Systems*, vol 3 (4), pp 353 – 364. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8233581>. (Acceso 05/09/2023, traducción propia)
23. Tefera, W. M. y Kasiviswanathan, K. S. (2022). A global-scale hydropower potential assessment and feasibility evaluations. *Journal of Water Resources and Economics*, vol 38. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2212428422000068> (Acceso 04/09/2023, traducción propia)
24. Th rhallsd ttir, T. E. (2007). Environment and energy in Iceland: A comparative analysis of values and impacts. *Environmental Impact Assessment Review*, vol 27 (6), pp 522-544. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0195925506001363>. (Acceso 06/08/2023, traducción propia)
25. Vitiello, S., Andreadou, N., Ardelean, M. y Fulli, G. (2022). Smart metering roll-out in Europe: where do we stand? cost benefit analyses in the clean energy Package and research trends in the green deal. *Energies*, 15(7), pp 2340. Disponible en : <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/7/2340#metrics> (Acceso 12/08/2023, traducción propia)
26. Wilde-Ramsing, J. y Potter, B. (2006). Blazing the green path: renewable energy and state-society relations in Costa Rica. *The Journal of Energy Development*, vol 32 (1) pp 69-91. Disponible en: <https://www.jstor.org/stable/24812850>. (Acceso 12/08/2023, traducción propia)

27. Yla-Mella, J. y Pongracz, E. (2016). Drivers and Constraints of Critical Materials Recycling: The Case of Indium. *Journal of Energy and Environmental Engineering*, vol 5 (4). Disponible en: <https://www.mdpi.com/2079-9276/5/4/34>. (Acceso 05/09/2023, traducción propia)

Sitios de internet

28. Cambridge Dictionary (2023). Energy. *Cambridge University Press & Assessment*. Disponible en: <https://dictionary.cambridge.org/dictionary/english/energy>. (Acceso 12/04/2023, traducción propia).
29. Capture Atlas (2023). Map of Iceland – 15 Tourist Maps of Iceland. *Capture Atlas*. Disponible en : <https://capturetheatlas.com/map-of-iceland/> (Acceso 10/07/2023)
30. Eunice (2023). *Tilos Project*. Eunice Energy Group. Disponible en: <https://eunice-group.com/projects/tilos-project/> (Acceso 27/06/2023, traducción propia)
31. Global Solar Atlas (2023). Tilos. *Energydata.info*. Disponible en: <https://globalsolaratlas.info/detail?s=36.456636,27.36145&m=site&c=36.429017,27.316132,11>. (Acceso 23/06/2023)
32. Global Wind Atlas (2023). Tilos. *Energydata.info*. Disponible en : <https://globalwindatlas.info/fr> (Acceso 27/06/2023)
33. Greek Boston (2023). *Tilos*. Disponible en : <https://www.greekboston.com/travel/tilos-weather/>. (Acceso 23/06/2023)
34. IEA (2023). *International Energy Agency*, “online resources”. Disponible en : <https://www.iea.org/>. (Acceso 01/06/2023)
35. Nations Online (2023). Map of Costa Rica. *Nations Online*. Disponible en: <https://www.nationsonline.org/oneworld/map/costa-rica-map.htm>. (Acceso 12/08/2023)
36. Our World in Data (2023). Share of electricity production from renewables. *Our World Data*, noviembre 2023. Disponible en: https://ourworldindata.org/grapher/share-electricity-renewables?tab=chart&country=OWID_WRL~SWE~FRA~BRA~CHN~IND~USA~CRI~GRC~ISL (Acceso 03/11/2023, traducción propia)
37. Statista b (2023). Electricity prices for households in Iceland from 1st quarter 2012 to 1st quarter 2022. *Statista Research Department*, 9 de agosto 2023. Disponible en : <https://www.statista.com/statistics/643385/electricity-prices-for-households-in-iceland/> (Acceso 31/08/2023, traducción propia)
38. Statista a (2023). Leading countries in installed renewable energy capacity worldwide in 2022. *Statista Research Department*, marzo 2023. Disponible en: <https://www.statista.com/statistics/267233/renewable-energy-capacity-worldwide-by-country/> (Acceso 03/11/2023)

39. Visit Costa Rica (2023). Conozca Costa Rica. *Visit Costa Rica*. Disponible en: <https://www.visitcostarica.com/es/costa-rica/general-information>. (Acceso 12/08/2023)

Material periodístico

40. Andritz (2023). Costa Rica - The Country of Renewable Power. *Andritz*, fecha desconocida. Disponible en : <https://www.andritz.com/hydro-en/hydroneews/americas/07-costa-rica#:~:text=Costa%20Rica%20has%20a%20total,the%20nation's%20total%20power%20production>. (Acceso 05/09/2023, traducción propia)
41. Le Monde (2015). L'Islande annonce le retrait de sa candidature à l'Union européenne. *Le Monde*, March 12th, 2015, versión en línea. Disponible en : https://www.lemonde.fr/europe/article/2015/03/12/l-islande-annonce-le-retrait-de-sa-candidature-a-l-union-europeenne_4592749_3214.html. (Acceso 10/07/2023, traducción propia)
42. National Grid (2022). Onshore vs offshore wind energy: what's the difference? *National Grid*, 18 de marzo 2022. Disponible en: <https://www.nationalgrid.com/stories/energy-explained/onshore-vs-offshore-wind-energy>. (Acceso 28/08/2023, traducción propia)
43. NS Energy (2023). Cauchari Solar Project, Jujuy. *NS Energy*. Disponible en : <https://www.nsenergybusiness.com/projects/cauchari-solar-project-jujuy/>. (Acceso 05/09/2023, traducción propia)
44. Balogh, A. (2021). Europe's islands are leading the charge in the clean energy transition. *European Commission*, 6 de octubre 2021. Disponible en: <https://ec.europa.eu/research-and-innovation/en/horizon-magazine/europes-islands-are-leading-charge-clean-energy-transition#:~:text=Republish-,Europe's%20islands%20are%20leading%20the%20charge%20in%20the%20clean%20energy,sea%20levels%2C%20drought%20and%20flooding>. (Acceso 12/04/2023, traducción propia).
45. Gaudiaut, T. (2022). Quel âge ont nos centrales nucléaires? *Statista*, 28 de octubre 2022. Disponible en: <https://fr.statista.com/infographie/28575/age-moyen-parc-reacteurs-nucleaires-par-pays/#:~:text=Quant%20aux%20r%C3%A9acteurs%20fran%C3%A7ais%20en,%C3%A9t%C3%A9%20mis%20%C3%A0%20la%20retraite>. (Acceso 28/08/2023, traducción propia)
46. Hope, K. (2021). The Greek island where renewable energy and hybrid cars rule. *Inside Climate News*, March 2, 2021. Disponible en: <https://insideclimatenews.org/news/02032021/greece-clean-energy-islands-tilos-hybrid-power-battery-storage/> (Acceso 23/06/2023, traducción propia)
47. Jayet, S. (2016). Qu'est ce que le LCOE ? *Connaissance des énergies*, 9 de mayo 2016. Disponible en: <https://www.connaissancedesenergies.org/questions-et-reponses-energies/quest-ce-que-le-lcoe>. (Acceso 28/08/2023, traducción propia)

48. King, S. (2018). A Natural Hub to Reach the Americas & the World. *Site Selection Magazine*, noviembre 2018. Disponible en: <https://siterelection.com/issues/2018/nov/costa-rica-a-natural-hub-to-reach-the-americas-and-the-world.cfm#:~:text=Companies%20like%20Intel%2C%20Amazon%2C%20Allergan,country's%20innovative%20and%20unique%20essence.&text=If%20you're%20looking%20for,Rica%20has%20them%20in%20abundance>. (Acceso 12/08/2023, traducción propia)
49. Koop, J. (2023). Argentina quiere lograr una gran expansión de las energías renovables para 2030. *Dialogo Chino.net*, 20 de julio 2023. Disponible en: <https://dialogochino.net/es/clima-y-energia-es/374748-argentina-quiere-lograr-una-gran-expansion-de-las-energias-renovables-para-2030/> (Acceso 07/09/2023)
50. O'Neill, A. (2023). The 20 countries with the largest gross domestic product (GDP) in 2022. *Statista*, 4 de julio 2023. Disponible en: <https://www.statista.com/statistics/268173/countries-with-the-largest-gross-domestic-product-gdp/#:~:text=Global%20gross%20domestic%20product%20amounts,well%20as%20four%20of%20the> (Acceso 06/08/2023, traducción propia)
51. Our world in data (2023). Share of electricity production from renewables - table. *Our world in data*, 2023. Disponible en: <https://ourworldindata.org/emissions-by-sector>. (Acceso 12/07/2023)
52. Power Technology (2023). Wind power capacity in Argentina and major projects. *Power Technology*, 20 de junio 2023. Disponible en: <https://www.power-technology.com/data-insights/wind-power-in-argentina/?cf-view>. (Acceso 04/11/2023, traducción propia)
53. Richter, A. (2020). Global map to identify areas suitable to geothermal power plants. *Think Geoenergy*, 3 de junio 2020. Disponible en: <https://www.thinkgeoenergy.com/global-map-to-identify-areas-suitable-for-geothermal-power-plants/>. (Acceso 04/08/2023)
54. Ritchie, H. (2022). How does the land use of different electricity sources compare? *Our World in data*, 16 de junio 2022. Disponible en: <https://ourworldindata.org/land-use-per-energy-source>. (Acceso 29/08/2023, traducción propia)

Fuentes oficiales

55. European Union (2023). Renewable Energy Sector in Central America. *European Union – Central America Association Agreement*, diciembre 2021. Disponible en: https://trade.ec.europa.eu/access-to-markets/en/country-assets/euca_04_Renewable%20Energy%20sector%20in%20Central%20America.pdf. (Acceso 12/08/2023, traducción propia)
56. Greek National Tourism Information (2023). *Tilos*. Disponible en : <https://www.visitgreece.gr/islands/dodecanese/tilos/>. (Acceso 23/06/2023, traducción propia)

57. Gobierno de Costa Rica (2018). National Decarbonization Plan – country commitment 2018 – 2050. Costa Rica Bicentennial Government 2018 – 2022. Disponible en: <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/NationalDecarbonizationPlan.pdf>. (Acceso 06/08/2023, traducción propia)
58. Government of Iceland (2023). About Iceland. *Government of Iceland*. Disponible en: <https://www.government.is/>. (Acceso 10/07/2023, traducción propia)
59. Huttner, G. W. (2021). Geothermal Power Generation in the World 2015-2020 Update Report. *Proceedings World Geothermal Congress 2020*, Octubre 2021, Reykjavik, Islandia. Disponible en : <https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2020/01017.pdf>. (Acceso 05/09/2023, traducción propia)
60. IEA (2022). World Energy Outlook 2022. *International Energy Agency*, noviembre 2022. Disponible en: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/830fe099-5530-48f2-a7c1-11f35d510983/WorldEnergyOutlook2022.pdf>. (Acceso 12/08/2023, traducción propia)
61. IEA (2023). Renewable Energy Market Update June 2023. *International Energy Agency*, June 2023. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/renewable-energy-market-update-june-2023/executive-summary>. (Acceso 03/11/2023, traducción propia)
62. INSEE (2021). Renewable Energies. *Institut National de la Statistiques et des Études Economiques*. Disponible en: <https://www.insee.fr/en/metadonnees/definition/c1898>. (Acceso 12/04/2023).
63. INSEE a (2023). Greenhouse gas (emissions). *Institut National de la Statistique et des études économiques*. Disponible en : <https://www.insee.fr/en/metadonnees/definition/c1855>. (Acceso 12/08/2023, traducción propia)
64. INSEE b (2023). Industrial economy. *Institut National de la Statistique et des études économiques*. Disponible en: <https://www.insee.fr/en/metadonnees/definition/c1426>. (Acceso 12/08/2023, traducción propia)
65. International Monetary Fund (IMF) a (2023). IMF reports and publication by country. *International Monetary Fund*. Disponible en: <https://www.imf.org/en/Home>. (Acceso 12/04/2023)
66. International Monetary Fund b (2023). Government expenditure, percent of GDP. *International Monetary Fund*. Disponible en: <https://www.imf.org/external/datamapper/exp@FPP/USA/FRA/JPN/GBR/SWE/ESP/ITA/ZAF/IN> (Acceso 28/08/2023)
67. International Renewable Energy Agency (IRENA) (2017). Electricity storage and renewables: costs and markets to 2030. *International Renewable Energy Agency*, octubre 2017. Disponible en: <https://www.irena.org/Publications/2017/Oct/Electricity-storage-and-renewables-costs-and-markets>. (Acceso 28/08/2023, traducción propia)

68. IRENA (2023). World Energy Transition Outlook 2023 – Volume 1. *International Renewable Energy Agency*. Disponible en: <https://www.irena.org/Digital-Report/World-Energy-Transitions-Outlook-2023>. (Acceso 03/11/2023)
69. Lazard (2023). 2023 Levelized Cost of Energy+. *Lazard*, abril 2023. Disponible en: <https://www.lazard.com/research-insights/2023-levelized-cost-of-energyplus/>. (Acceso 26/08/2023, traducción propia)
70. Ministry of Environment (2007). Iceland’s Climate Change Strategy. *Government of Iceland*, febrero 2007. Disponible en: https://www.government.is/media/umhverfisraduneyti-media/media/PDF_skrar/Stefnumorkun_i_loftslagsmalum_enlokagerd.pdf. (Acceso 06/08/2023, traducción propia)
71. Ministry of Industries and Innovation (2020). A Sustainable Energy Future. An Energy Policy to the year 2050. *Government of Iceland*, septiembre 2020. Disponible en: <https://www.stjornarradid.is/lisalib/getfile.aspx?itemid=e36477fd-3bc1-11eb-8129-005056bc8c60>. (Acceso 06/08/2023, traducción propia)
72. Ministère de la Transition écologique et de la cohésion des territoires (MTECT) (2021). Installations nucléaires en France. *LegiFrance.gouv*, 26 de octubre 2021. Disponible en: <https://www.ecologie.gouv.fr/installations-nucleaires-en-france#:~:text=Les%20r%C3%A9acteurs%20%C3%A9lectronucl%C3%A9aires&text=R%C3%A9partis%20sur%2018%20sites%2C%20les,de%20pr%C3%A8s%20de%2063%20GWe>. (Acceso 28/08/2023, own traduction)
73. Municipality of Tilos (2023). *The Island of Tilos*. Municipality of Tilos. Available at: <https://www.tilos.gr/>. (Acceso 23/06/2023, traducción propia)
74. OECD (2022). OECD Transfer Pricing Guidelines for Multinational Enterprises and Tax Administrations 2022. *Organisation for Economic Co-Operation and Development*, enero 2022. Disponible en: <https://www.oecd.org/tax/transfer-pricing/oecd-transfer-pricing-guidelines-for-multinational-enterprises-and-tax-administrations-20769717.htm> (Acceso 31/08/2023, traducción propia)
75. OECD a (2023). OECD Economic surveys – Iceland. *Organisation for Economic Co-operation and Development*, junio 2023. Disponible en : <https://www.oecd.org/economy/iceland-economic-snapshot/>. (Acceso 11/07/2023, traducción propia)
76. OECD b (2023). Études économiques de l’OCDE : Costa Rica 2023. *OECD Publications*. Disponible en: https://www.oecd-ilibrary.org/sites/36c4db42-fr/1/3/1/index.html?itemId=/content/publication/36c4db42-fr&_csp_=f6e5fa7d67b5c529b9c9ac1880753194&itemIGO=oecd&itemContentType=book#figure-d1e2183-6252f97c07. (Acceso 12/08/2023, traducción propia)
77. OECD c (2023). Renewable energy feed in tariffs. *OECD.stat*, 31 de agosto 2023. Disponible en: https://stats.oecd.org/Index.aspx?DataSetCode=RE_FIT. (Acceso 31/08/2023, traducción propia)

78. OECD Data (2023). Renewable energy. *Organisation for Economic Co-Operation and Development Data*. Disponible en: <https://data.oecd.org/energy/renewable-energy.htm>. (Acceso 03/11/2023, traducción propia)
79. Orkustofnun (2023). Transmission System Operator. *Orkustofnun, Iceland National Energy Authority*. Disponible en: <https://nea.is/hydro-power/electric-power/transmission/>. (Acceso 06/08/2023, traducción propia)
80. Réseau de Transport d'Electricité (RTE) (2023). Tracking and understanding CO2 emissions per kWh generated in France. *Réseau de Transport d'Electricité*, 29 de agosto 2023. Disponible en: <https://www.rte-france.com/en/eco2mix/co2-emissions>. (Acceso 29/08/2023, traducción propia)
81. S4S (2023). Energy production real data. *Eunice Energy Group*. Disponible en : <http://s4s.eunice.gr> (Acceso 27/06/2023)
82. Secretario de Energia (2023). Comité de administración del fondo fiduciario para el transporte eléctrico federal. *Ministerio de Economía*. Disponible en: <https://www.cfee.gov.ar/plan-federal-1.php>. (Acceso 04/11/2023)
83. Statistics Iceland (2023). *Production approach*. Statistics Iceland. Disponible en: <https://www.statice.is/statistics/economy/national-accounts/production-approach/>. (Acceso 11/07/2023, traducción propia)
84. Taylor, M. (2020). Energy subsidies: Evolution in the global energy transformation to 2050. *International Renewable Energy Agency (IRENA)*, Abu Dhabi. Disponible en: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Apr/IRENA_Energy_subsidies_2020.pdf (Acceso 28/08/2023, traducción propia)
85. Tupy, T. (2009). The Importance of the Legal and Regulatory Framework for the Development of Renewable Energy. *Organization for Security and Co-operation in Europe (OSCE)*, Baku septiembre 2009. Disponible en: <https://www.osce.org/files/f/documents/3/6/41263.pdf>. (Acceso 01/09/2023, traducción propia)
86. United Nations (1992). United Nations Framework Convention on Climate Change (with annexes). *United Nations*, mayo 1992. Disponible en: https://treaties.un.org/doc/source/recenttexts/unfccc_eng.pdf. (Acceso 06/08/2023)
87. United Nations (1997). Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change. *United Nations*, diciembre 1997. Disponible en: <https://digitallibrary.un.org/record/250111?ln=fr>. (Acceso 06/08/2023)
88. United Nations Development Program (2023). Human Development Reports. *United Nations Development Program*. Disponible en : <https://hdr.undp.org/data-center/country-insights#/ranks>. (Acceso 07/08/2023)
89. United Nations Framework Convention on Climate Change (2016). *Paris' agreement*. United Nations Framework Convention on Climate Change, 2016. Disponible en:

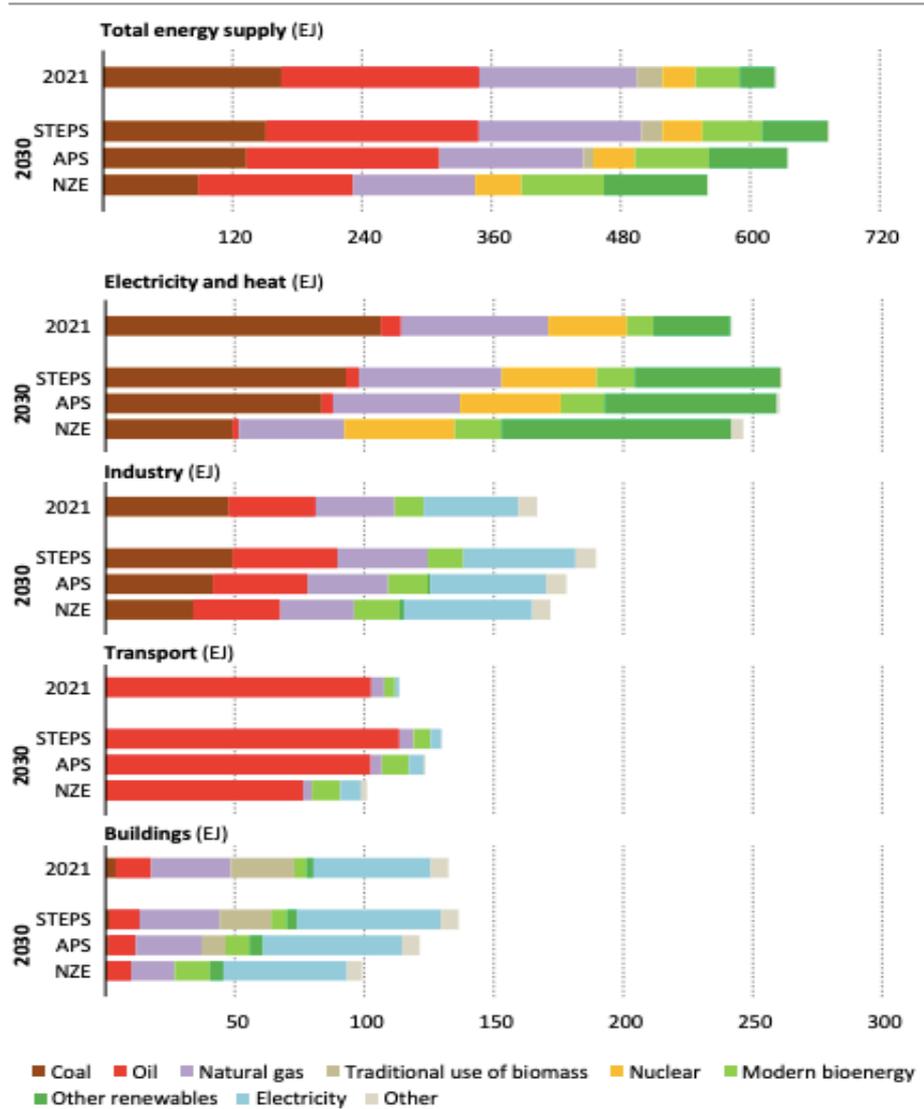
<https://unfccc.int/fr/a-propos-des-ndcs/l-accord-de-paris>. (Acceso 12/04/2023, traducción propia)

90. US Energy Information Administration (2023). Electricity Explained. *Independent Statistics and Analysis*. Disponible en: <https://www.eia.gov/energyexplained/electricity/> (Acceso 12/04/2023, traducción propia)
91. US International Trade Administration (2023). Iceland – Country Commercial Guide. *International Trade Administration*, US Department of Commerce. Disponible en : <https://www.trade.gov/country-commercial-guides/iceland-market-overview>. (Acceso 10/07/2023, traducción propia)

ANEXOS

Anexo A: Consumo de energía según el sector (IEA, 2022)³⁵

Figure 1.10 ▶ Global energy supply and demand by sector, scenario and fuel



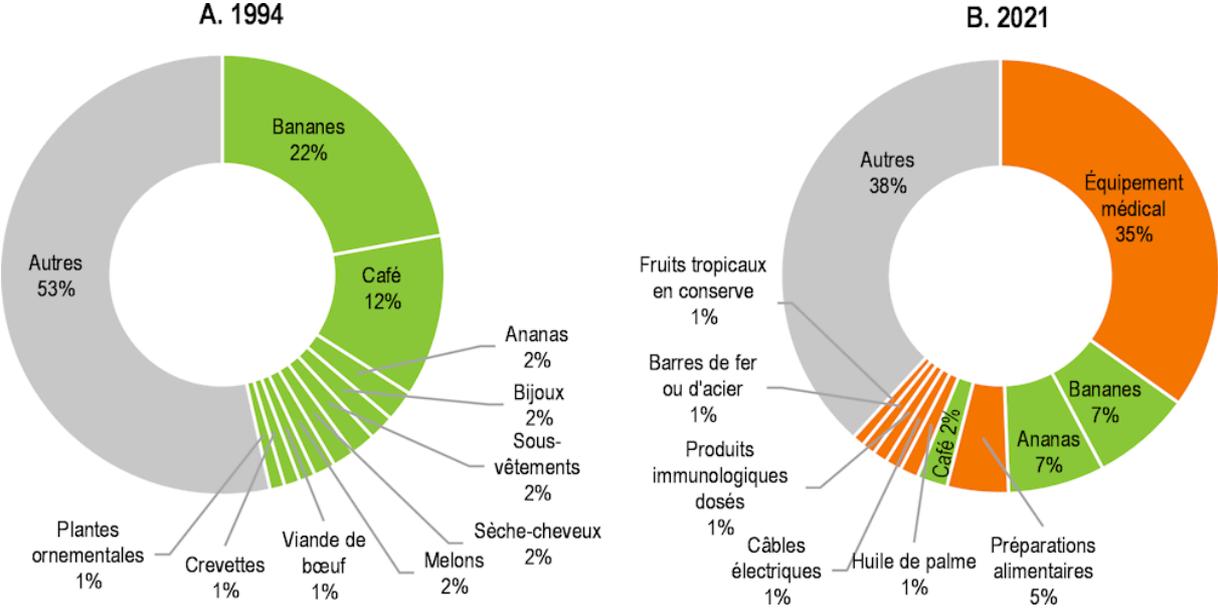
IEA. CC BY 4.0.

35 “Stated Policies Scenario (STEPS) shows the trajectory implied by today’s policy settings.

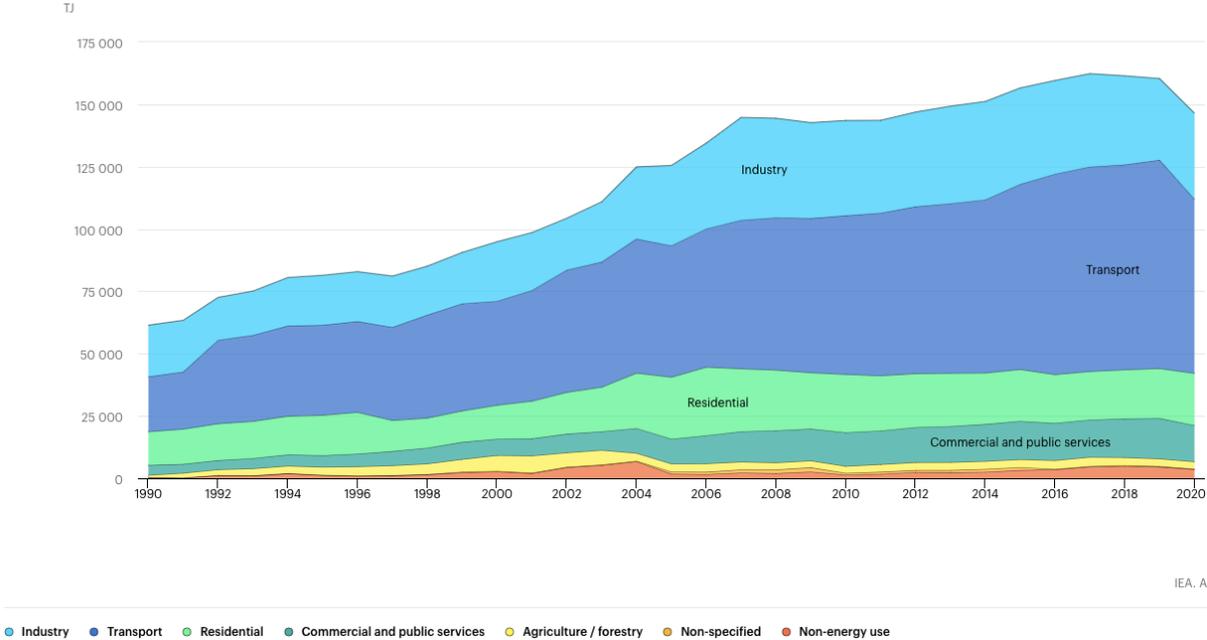
The Announced Pledges Scenario (APS) assumes that all aspirational targets announced by governments are met on time and in full, including their long-term net zero and energy access goals.

The Net Zero Emissions by 2050 (NZE) Scenario maps out a way to achieve a 1.5 °C stabilisation in the rise in global average temperatures, alongside universal access to modern energy by 2030.”

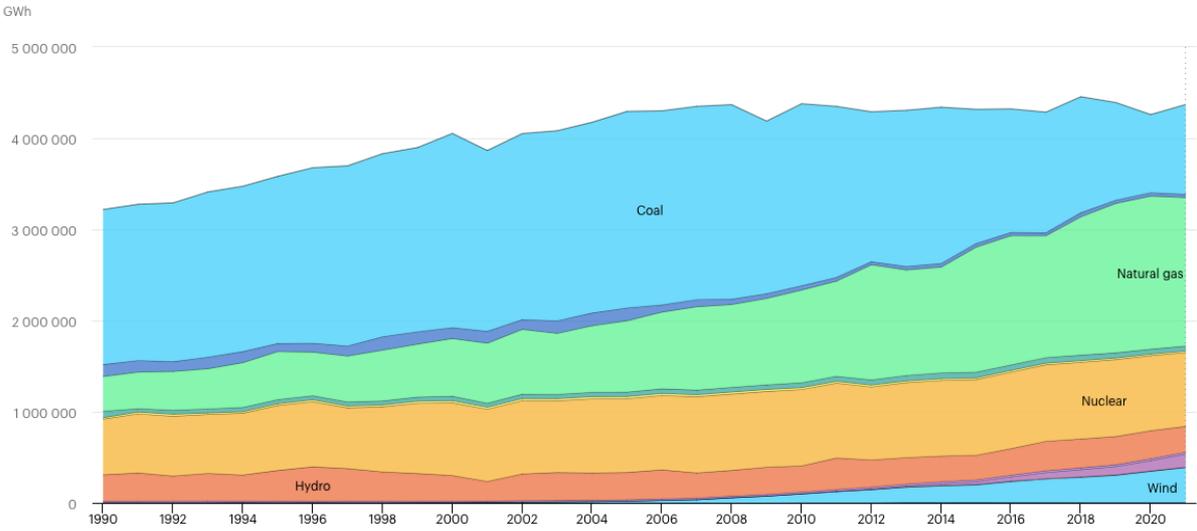
Anexo B: Evolución de los exportes de Costa Rica de 1994 a 2021 (OECD b, 2023)



Anexo C: Consumo de energía según el sector en Costa Rica (IEA, 2023)



Anexo D: Producción de energía en los Estados Unidos de 1990 a 2023 (IEA, 2023)



Anexo E: Tabla de consumo de los países en la base de datos de la IEA en 2020

#	Países	PIB en 2015	Población	Consumo en energía 2020	Producción en energía	Consumo eléctrico	Rango	Contribución consumo global
		<i>bn USD</i>	<i>millón</i>	<i>TJ</i>	<i>TJ</i>	<i>TWh</i>		<i>%</i>
1	Albania	12.52	2.84	78 380	62.38	6.68	131	0.02%
2	Algeria	168.5	43.85	1 705 601	5 710.38	70.11	34	0.44%
3	Andorra	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
4	Angola	103.88	32.87	408 291	3 200.81	14.54	80	0.11%
5	Argentina	558.18	45.38	2 150 383	3 055.95	127.67	31	0.56%
6	Armenia	11.92	2.96	109 355	40.17	6.26	125	0.03%
7	Australia	1389.56	25.74	3 376 732	18 949.88	254	21	0.88%
8	Austria	403.78	8.96	1 109 701	502.00	71.57	43	0.29%
9	Azerbaijan	51.29	10.09	448 400	2 457.65	22.78	78	0.12%
10	Bahrain	33.26	1.7	276 036	1 013.21	31.98	94	0.07%
11	Bangladesh	269.85	164.69	1 249 572	1 260.23	82.01	40	0.32%
12	Belarus	58.64	9.38	781 637	186.31	35.31	55	0.20%
13	Belgium	496.05	11.59	1 591 298	575.69	50.32	36	0.41%
14	Benin	14.73	12.12	191 523	124.35	1.29	104	0.05%
15	Bolivia	34.86	11.67	259 649	716.36	9.09	98	0.07%
16	Bosnia and Herzegovina	17.83	3.28	172 819	219.39	11.59	109	0.04%
17	Botswana	14.8	2.35	70 326	65.31	3.6	132	0.02%
18	Brazil	1749.1	212.56	9 337 823	13 472.29	540.19	6	2.42%
19	Brunei Darussalam	13.43	0.437	63 374	604.57	5.3	135	0.02%
20	Bulgaria	54.92	6.93	413 286	450.92	34.76	79	0.11%
21	Burkina Faso	15.025	20.321	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.

#	Países	PIB en 2015	Población	Consumo en energía 2020	Producción en energía	Consumo eléctrico	Rango	Contribución consumo global
		<i>bn USD</i>	<i>millón</i>	<i>TJ</i>	<i>TJ</i>	<i>TWh</i>		<i>%</i>
22	Burundi	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
23	Cabo Verde	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
24	Cambodia	23	16.72	298 504	161.19	11.49	92	0.08%
25	Cameroon	37.69	26.55	339 984	556.43	7.09	88	0.09%
26	Canada	1681.42	38.25	7 956 705	21 681.76	561.39	9	2.06%
27	Central African Republic	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
28	Chad	10.526	15.947	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
29	Chile	274.92	19.67	1 129 691	535.07	80.71	42	0.29%
30	China	14686.18	1410.93	91 352 263	117 060.83	7424.99	1	23.71%
31	Chinese Taipei	593.18	23.82	2 951 928	473.95	270.64	24	0.77%
32	Colombia	330.3	49.94	1 194 750	4 023.51	74.44	41	0.31%
33	Comoros	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
34	Congo	8.84	5.52	80 825	786.28	0.3846	129	0.02%
35	Costa Rica	66.46	5.16	146 485	108.44	10.19	113	0.04%
36	Cote D'Ivoire	61.03	26.38	322 993	440.45	8.34	91	0.08%
37	Croatia	52.56	4.05	290 721	155.75	16.3	93	0.08%
38	Cuba	81.05	11.33	250 163	196.36	17.03	100	0.06%
39	Curacao	2.37	0.155	28 223	0.77	0.7471	141	0.01%
40	Cyprus	23.64	0.876	63 309	7.00	4.61	136	0.02%
41	Czech Republic	209.76	10.7	1 082 347	991.43	67.25	44	0.28%
42	Democratic Republic of the Congo	45.26	89.56	843 408	1 315.49	9.9	52	0.22%
43	Denmark	341.4	5.85	545 430	385.60	34.55	70	0.14%

#	Países	PIB en 2015	Población	Consumo en energía 2020	Producción en energía	Consumo eléctrico	Rango	Contribución consumo global
		<i>bn USD</i>	<i>millón</i>	<i>TJ</i>	<i>TJ</i>	<i>TWh</i>		<i>%</i>
44	Djibouti	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
45	Dominican Republic	83.29	10.85	262 723	48.15	14.47	97	0.07%
46	Ecuador	93.78	17.64	465 100	1 184.03	25.77	74	0.12%
47	Egypt	397.31	102.33	2 368 812	3 625.35	157.97	29	0.61%
48	El Salvador	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
49	Equatorial Guinea	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
50	Eritrea	2.27	3.55	26 697	30.89	0.3277	142	0.01%
51	Estonia	28.47	1.33	121 801	183.38	9.22	124	0.03%
52	Eswatini	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
53	Ethiopia	93.51	114.96	1 787 861	1717.4254	10.48	33	0.46%
54	Finland	257.05	5.54	1 012 394	770.37	80.9	46	0.26%
55	France	2576.67	68.22	5 777 901	5 019.14	450.83	13	1.50%
56	Gabon	15.17	2.23	172 717	615.88	2.43	110	0.04%
57	Gambia	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
58	Georgia	16.56	3.71	187 846	43.54	11.73	106	0.05%
59	Germany	3531.16	83.2	8 955 070	4 045.70	526.7	7	2.32%
60	Ghana	62.72	31.07	361 638	707.57	16.68	85	0.09%
61	Gibraltar	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
62	Greece	200.79	10.67	624 542	751.53	51.9	66	0.16%
63	Guatemala	69.56	16.86	503 479	410.73	11.79	73	0.13%
64	Guinea	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
65	Guinea-Bissau	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
66	Haiti	14.32	11.4	141 283	141.9325	0.407	114	0.04%

#	Países	PIB en 2015	Población	Consumo en energía 2020	Producción en energía	Consumo eléctrico	Rango	Contribución consumo global
		<i>bn USD</i>	<i>millón</i>	<i>TJ</i>	<i>TJ</i>	<i>TWh</i>		<i>%</i>
67	Honduras	22.18	9.91	160 021	111.37	6.88	112	0.04%
68	Hong Kong	310.24	7.48	330 292	4.71	46.29	89	0.09%
69	Hungary	150.15	9.71	832 924	451.76	43.47	54	0.22%
70	Iceland	20.22	0.373	125 694	220.64	18.59	120	0.03%
71	India	2560.07	1380	24 973 701	23 780.60	1280.7	3	6.48%
72	Indonesia	1027.67	273.52	6 344 645	18 697.41	268.12	12	1.65%
73	Iran	457.81	83.99	8 146 739	13 821.46	286.69	8	2.11%
74	Iraq	184.41	40.22	884 918	9 018.79	50.47	49	0.23%
75	Ireland	445.37	5.02	457 320	145.70	29.82	75	0.12%
76	Israel	373.74	9.37	631 448	494.88	62.84	65	0.16%
77	Italy	1860.82	59.11	4 498 110	1 473.33	295.37	17	1.17%
78	Jamaica	13.41	2.96	60 123	8.01	3.17	137	0.02%
79	Japan	4435.82	125.5	11 008 802	1 815.82	971.51	5	2.86%
80	Jordan	41.11	10.2	238 685	33.08	18.93	101	0.06%
81	Kazakhstan	204.82	18.75	1 688 617	6 658.27	103.39	35	0.44%
82	Kenya	83.86	53.77	751 555	973.01	8.94	57	0.20%
83	Korea	1688.96	51.95	7 312 586	2 206.44	559.98	10	1.90%
84	Korea, Democratic People's Republic of	30.05	25.78	573 403	581.55	12.81	68	0.15%
85	Kosovo	7.09	1.78	65 922	79.55	5.45	134	0.02%
86	Kuwait	104.34	4.27	752 232	6 369.38	68.12	56	0.20%
87	Kyrgyzstan	7.22	6.59	134 322	102.58	12.71	117	0.03%
88	Laos	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
89	Latvia	29.46	1.9	163 129	113.46	6.97	111	0.04%

#	Países	PIB en 2015	Población	Consumo en energía 2020	Producción en energía	Consumo eléctrico	Rango	Contribución consumo global
		<i>bn USD</i>	<i>millón</i>	<i>TJ</i>	<i>TJ</i>	<i>TWh</i>		<i>%</i>
90	Lebanon	36.49	6.83	175 911	11.65	16.35	108	0.05%
91	Lesotho	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
92	Liberia	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
93	Libya	14.05	6.87	365 384	1 345.22	24.81	84	0.09%
94	Liechtenstein	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
95	Lithuania	47.62	2.8	267 288	82.48	12.47	95	0.07%
96	Luxembourg	64.02	0.631	138 194	12.67	7.55	116	0.04%
97	Madagascar	13.411	26.969	250 466	n.a.	n.a.	99	0.06%
98	Malawi	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
99	Malaysia	343.62	32.37	2 535 145	3846.226	168.32	26	0.66%
100	Mali	16.061	19.658	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
101	Malta	12.66	0.53	20 638	1.1221	2.43	144	0.01%
102	Mauritania	6.991	4.526	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
103	Mauritius	11.47	1.27	32 390	7.6367	2.74	138	0.01%
104	Mexico	1151.03	126.95	4 035 135	6 199	282	19	1.05%
105	Moldova	8.51	2.62	122 038	3.9	8.03	123	0.03%
106	Monaco	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
107	Mongolia	13.37	3.28	176 418	1011.5309	7.27	107	0.05%
108	Montenegro	4.06	0.62	30 441	30.3836	2.97	139	0.01%
109	Morocco	104.66	36.91	653 782	21.04	62.23	63	0.17%
110	Mozambique	17.98	31.26	342 303	745.6691	12.24	87	0.09%
111	Myanmar	77.55	54.41	839 877	1152.626	15.07	53	0.22%
112	Namibia	10.48	2.54	69 778	28.6419	3.84	133	0.02%
113	Nepal	26.27	29.14	618 181	453.4304	7.48	67	0.16%

#	Países	PIB en 2015	Población	Consumo en energía 2020	Producción en energía	Consumo eléctrico	Rango	Contribución consumo global
		<i>bn USD</i>	<i>millón</i>	<i>TJ</i>	<i>TJ</i>	<i>TWh</i>		<i>%</i>
114	New Zealand	202.71	5.11	563 132	616.7156	41.59	69	0.15%
115	Nicaragua	12.73	6.62	109 016	94.203	3.82	126	0.03%
116	Niger	12.44	24.21	139 788	152.8182	1.41	115	0.04%
117	Nigeria	499.18	206.14	5 710 383	9955.7917	27.56	14	1.48%
118	North Macedonia	10.61	2.08	78 597	41.7173	6.65	130	0.02%
119	Norway	403.78	5.38	859 625	8728.64	124.87	51	0.22%
120	Oman	78.57	5.11	923 792	3358.651	34.43	47	0.24%
121	Pakistan	323.8	220.89	3 702 984	3041.7102	110.36	20	0.96%
122	Panama	52.5	4.31	123 092	42.7054	9.28	122	0.03%
123	Paraguay	40.27	7.13	263 360	293.076	14.14	96	0.07%
124	Peru	190.98	32.97	742 817	946.6355	46.4	58	0.19%
125	Philippines	358.29	109.58	1 354 763	1307.119	92.01	38	0.35%
126	Poland	554.8	38.35	3 173 189	2422.482	161.31	23	0.82%
127	Portugal	205.14	10.3	652 213	254.5574	50.03	64	0.17%
128	Qatar	167.08	2.88	910 668	9257.0148	46.48	48	0.24%
129	Romania	207.95	19.29	1 026 380	937.4245	52.53	45	0.27%
130	Russia	1416.12	144.1	21 187 312	n.a.	n.a.	4	5.50%
131	Rwanda	11.235	12.627	127 205	n.a.	n.a.	119	0.03%
132	San Marino	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
133	Sao Tome and Principe	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
134	Saudi Arabia	650.71	34.81	6 372 230	25477.09	358.97	11	1.65%
135	Senegal	22.12	16.74	124 595	85.8294	5.4	121	0.03%
136	Serbia	45.11	6.91	392 838	459.292	32.97	82	0.10%
137	Seychelles	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.

#	Países	PIB en 2015	Población	Consumo en energía 2020	Producción en energía	Consumo eléctrico	Rango	Contribución consumo global
		<i>bn USD</i>	<i>millón</i>	<i>TJ</i>	<i>TJ</i>	<i>TWh</i>		<i>%</i>
138	Sierra Leone	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
139	Singapore	330.1	5.69	740 255	3471.2759	52.9	59	0.19%
140	Slovak Republic	94.21	5.46	454 690	288.0518	27.57	76	0.12%
141	Slovenia	47.43	2.1	189 842	151.5622	14.34	105	0.05%
142	Somalia	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
143	South Africa	303.72	59.31	2 497 408	6315.369	209.81	27	0.65%
144	South Sudan	12.52	11.19	23 850	360.9022	0.5358	143	0.01%
145	Spain	1241.57	47.33	3 223 866	1443.608	241.02	22	0.84%
146	Sri Lanka	88.83	21.92	383 633	191.7554	14.08	83	0.10%
147	Sudan	88.98	43.85	542 587	734.3647	13.34	71	0.14%
148	Suriname	4.19	0.59	28 358	39.3601	1.79	140	0.01%
149	Sweden	534.57	10.35	1 329 976	1449.47	130.2	39	0.35%
150	Switzerland	767.16	8.71	720 003	522.094	61.81	60	0.19%
151	Syria	19.68	17.5	218 137	190.4994	12.62	102	0.06%
152	Tajikistan	10.86	9.54	129 373	105.5074	16.06	118	0.03%
153	Tanzania	61.52	59.73	871 219	880.484	6.96	50	0.23%
154	Thailand	432.7	69.8	4 047 537	2764.544	193.35	18	1.05%
155	The Netherlands	808.33	17.44	2 308 034	1140.4843	116.15	30	0.60%
156	Togo	5.19	8.28	95 077	126.0227	1.42	128	0.02%
157	Trinidad and Tobago	20.84	1.4	449 469	1225.0577	8.8	77	0.12%
158	Tunisia	42.2	11.82	326 066	208.5026	17.31	90	0.08%
159	Türkiye	1015.02	83.39	4 503 816	1853.0777	276.74	16	1.17%
160	Turkmenistan	48.48	6.03	671 577	3251.05	16.44	62	0.17%

#	Países	PIB en 2015	Población	Consumo en energía 2020	Producción en energía	Consumo eléctrico	Rango	Contribución consumo global
		<i>bn USD</i>	<i>millón</i>	<i>TJ</i>	<i>TJ</i>	<i>TWh</i>		<i>%</i>
161	Uganda	39.541	44.27	520 471	n.a.	n.a.	72	0.14%
162	Ukraine	97.69	44.13	2 000 162	2387.3134	130.54	32	0.52%
163	United Arab Emirates	371.14	9.89	2 415 799	9394.76	130.25	28	0.63%
164	United Kingdom	3111.31	67.53	4 774 852	4899.812	302.85	15	1.24%
165	United States	19278.19	330.15	61 178 467	90436.97	4109.39	2	15.88%
166	Uruguay	52.26	3.47	197 266	129.3721	11.83	103	0.05%
167	Uzbekistan	102.86	34.23	1 384 383	1894.1083	59.05	37	0.36%
168	Venezuela	166.25	28.44	708 159	2147.8284	50.51	61	0.18%
169	Viet Nam	258.51	97.34	2 787 610	2336.653	225.95	25	0.72%
170	Yemen	40.48	29.83	100 772	166.216	2.35	127	0.03%
171	Zambia	23.35	18.38	350 384	401.5141	11.85	86	0.09%
172	Zimbabwe	18.43	14.86	398 995	377.2307	7.25	81	0.10%

Anexo F: Países con los consumos en energía lo más importantes

Rango	Países	PIB en 2015 <i>bn USD</i>	Población <i>millón</i>	Consumo en energía en 2020 <i>TJ</i>	Producción en energía <i>TJ</i>	Consumo eléctrico <i>TWh</i>
36	Belgium	496.05	11.59	1 591 298	575.69	50.32
35	Kazakhstan	204.82	18.75	1 688 617	6 658.27	103.39
34	Algeria	168.5	43.85	1 705 601	5 710.38	70.11
33	Ethiopia	93.51	114.96	1 787 861	1717.4254	10.48
32	Ukraine	97.69	44.13	2 000 162	2387.3134	130.54
31	Argentina	558.18	45.38	2 150 383	3 055.95	127.67
30	The Netherlands	808.33	17.44	2 308 034	1140.4843	116.15
29	Egypt	397.31	102.33	2 368 812	3 625.35	157.97
28	United Arab Emirates	371.14	9.89	2 415 799	9394.76	130.25
27	South Africa	303.72	59.31	2 497 408	6315.369	209.81
26	Malaysia	343.62	32.37	2 535 145	3846.226	168.32
25	Viet Nam	258.51	97.34	2 787 610	2336.653	225.95
24	Chinese Taipei	593.18	23.82	2 951 928	473.95	270.64
23	Poland	554.8	38.35	3 173 189	2422.482	161.31
22	Spain	1241.57	47.33	3 223 866	1443.608	241.02
21	Australia	1389.56	25.74	3 376 732	18 949.88	254
20	Pakistan	323.8	220.89	3 702 984	3041.7102	110.36
19	Mexico	1151.03	126.95	4 035 135	6 199	282
18	Thailand	432.7	69.8	4 047 537	2764.544	193.35
17	Italy	1860.82	59.11	4 498 110	1 473.33	295.37
16	Türkiye	1015.02	83.39	4 503 816	1853.0777	276.74
15	United Kingdom	3111.31	67.53	4 774 852	4899.812	302.85
14	Nigeria	499.18	206.14	5 710 383	9955.7917	27.56

13	France	2576.67	68.22	5 777 901	5 019.14	450.83
12	Indonesia	1027.67	273.52	6 344 645	18 697.41	268.12
11	Saudi Arabia	650.71	34.81	6 372 230	25477.09	358.97
10	Korea	1688.96	51.95	7 312 586	2 206.44	559.98
9	Canada	1681.42	38.25	7 956 705	21 681.76	561.39
8	Iran	457.81	83.99	8 146 739	13 821.46	286.69
7	Germany	3531.16	83.2	8 955 070	4 045.70	526.7
6	Brazil	1749.1	212.56	9 337 823	13 472.29	540.19
5	Japan	4435.82	125.5	11 008 802	1 815.82	971.51
4	Russia	1416.12	144.1	21 187 312	n.a.	n.a.
3	India	2560.07	1380	24 973 701	23 780.60	1280.7
2	China	14686.18	1410.93	91 352 263	117 060.83	7424.99
1	United States	19278.19	330.15	61 178 467	90436.97	4109.39

Anexo G: Atlas del potencial solar fotovoltaico y del potencial eólico, por este orden

