



ENERGÍAS RENOVABLES

EN EL MUNDO RURAL

ICA





Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), 2023



Energías Renovables en el Mundo Rural
por IICA se encuentra publicado bajo
Licencia Creative Commons Reconocimiento-Compartir
igual 3.0 IGO (CC-BY-SA 3.0 IGO)
(<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/igo/>)
Creado a partir de la obra en www.iica.int

El Instituto promueve el uso justo de este documento, así como el tratamiento de los datos personales, de acuerdo con la normativa del IICA vigente. Se solicita que sea citado apropiadamente cuando corresponda y que se garantice el derecho de toda persona a la protección de sus datos personales, según la normativa del IICA.

Esta publicación está disponible en formato electrónico (PDF) en el sitio web institucional en <http://www.iica.int>.

Coordinación editorial: Agustín Torroba

Corrección de estilo: Unidad de Idiomas IICA

Diagramación y diseño: Laura Luna.

Energías Renovables en el Mundo Rural/ Agustín Torroba; Francisco Della Vecchia;
Ricardo Orozco Ramírez

-San José, C.R.: IICA, 2023.76 p ; 21 x 16 cm.

ISBN: 978-92-9273-040-6

1. Energía renovable 2. Electrificación 3. Mitigación del cambio climático 4.
Bioelectricidad 5. Desarrollo rural I. IICA
II. Título

Las ideas, las formas de expresión y los planteamientos de este documento son propios del autor (o autores), por lo que no necesariamente representan la opinión del IICA ni juicio alguno de su parte sobre las situaciones o condiciones planteadas.

San José, Costa Rica

2023

1. Introducción	1
2. El rol de las energías renovables en la descarbonización.	3
3. Energías renovables y sistemas de generación eléctrica con fuentes renovables: Aplicaciones en el mundo rural, tecnologías y desafíos.	14
3.1 Energías renovables y electrificación rural.	14
3.2 Tecnologías renovables para el mundo rural.	16
3.2.1 Energía solar fotovoltaica.	17
3.2.2 Energía eólica.	18
3.2.3 A base de biogás.	18
4. Aplicaciones de las energías renovables en las zonas agrícolas.	20
4.1 Biogás como opción para suplir la carencia de electrificación rural o complementar las puntas de línea disponibles.	23
4.2 Experiencia de suministro de biogás en una comunidad rural.	24
4.2.1 Experiencia de inyección de energía a base de biogás en la red eléctrica.	26
4.3 Energía solar fotovoltaica para abastecer el consumo eléctrico en zonas rurales.	27
4.3.1 Experiencia de suministro de energía eléctrica con sistemas fotovoltaicos en comunidades rurales aisladas de Perú.	28
4.3.2 Minirredes de sistemas fotovoltaicos para abastecer de electricidad a localidades rurales en la Argentina.	31
4.3.3 Energía eólica para abastecer el consumo eléctrico en zonas rurales.	33
5. Potencial en los países de las Américas.	35
6. Recomendaciones clave para los tomadores de decisiones.	41
7. Bibliografía.	44
Anexo 1. Papel de las energías renovables en el proceso de descarbonización, de acuerdo con distintos escenarios de la Irena.	50
Anexo 2. Consideraciones básicas para un estudio de prefactibilidad y el diseño de instalaciones de generación de energías renovables en zonas rurales.	58
Diagnóstico.	59
Prefactibilidad.	60
Diseño.	61

Ilustración 1. Consumo de energía y evolución en miles de kcal/persona/día.	1
Ilustración 2. Evolución de la población humana en el mundo (en millones de habitantes).	2
Ilustración 3. Matriz mundial de consumo de energía.	4
Ilustración 4. Evolución de los costos de las energías renovables frente a los de las fósiles.	4
Ilustración 5. Emisiones Globales netas de CO2 del NZE.	7
Ilustración 6. Reducción de emisiones mediante medidas de mitigación en el NZE durante el período 2020-2050.	8
Ilustración 7. Oferta energética total en el NZE.	9
Ilustración 8. Uso global de hidrógeno o combustible a base de hidrógeno en el NZE.	10
Ilustración 9. Oferta total de bioenergía en el NZE.	11
Ilustración 10. Nuevos trabajadores en el área de la energía limpia y sectores relacionados, ratios de calificación laboral y ocupación en el NZE y el STEPS en 2030.	12
Ilustración 11. Promedio anual de inversión en capital en el NZE.	13
Ilustración 12. ALC: Oferta energética primaria renovable por recurso energético (2019).	15
Ilustración 13. América Latina y el Caribe: proporción de la población sin acceso a electricidad por quintiles de ingreso (rural, urbano y total), último año disponible.	16
Ilustración 14. Crecimiento de la capacidad instalada de energías renovables en todo el mundo y en ALC (2012-2021).	17
Ilustración 15. Enfoque requerido para lograr el acceso universal a la electricidad en 2030 (como % de la generación).	22
Ilustración 16. Centrales de biogás unidas al sistema interconectado de Argentina.	26
Ilustración 17. Potencia eléctrica instalada por tecnología de fuente renovable en la República Argentina.	27
Ilustración 18. Sistemas fotovoltaicos aislados establecidos en varias comunidades rurales de Perú.	30
Ilustración 19. Minirredes fotovoltaicas para el abastecimiento de comunidades rurales de Jujuy, Argentina.	33
Ilustración 20. Vista general de la comunidad y de los aerogeneradores instalados en El Alumbre, Perú.	34
Ilustración 21. Índice de cobertura eléctrica (%) en los países de ALC (2020).	35
Ilustración 22. Evolución en las últimas cinco décadas del índice de cobertura eléctrica de la población de los países de ALC (2020).	36
Ilustración 23. Disponibilidad de recursos renovables en ALC.	37
Ilustración 24. Ejemplos de sitios ricos en recursos de energía renovable para la generación de electricidad en ALC.	38
Ilustración 25. Pastoreo de ovejas en parques fotovoltaicos.	40
Ilustración 26. El uso de las energías renovables, la eficiencia energética, los vehículos eléctricos y el hidrógeno pueden reducir en 2050 el conjunto requerido de emisiones.	51
Ilustración 27. Energías solar y eólica y otras fuentes renovables de generación energética hasta 2050.	52
Ilustración 28. Crecimiento del empleo en el sector energético, que alcanzaría los 100 millones en 2050.	53
Ilustración 29. Inversiones en energía durante el período 2016-2050.	54
Ilustración 30. Potencial de mitigación por conjunto de tecnologías por escenario durante el período 2020-2050.	56
Ilustración 31. Inversión por escenario, incluida la DDP.	57



Tabla 1. Propuesta de categorización de aplicaciones off-grid. _____	21
Tabla 2. Poder calorífico de diferentes fuentes fósiles de energía y del biogás. _____	23
Tabla 3. Resumen de los resultados obtenidos por el PNER, Perú (a febrero de 2020). _____	29



Símbolos y siglas

kW: Kilovatio

kWh: Kilovatio hora-1

kWp: Kilovatio pico

MW: Megavatio

MWh: Megavatio hora-1

Nm³: Normal metro cúbico

ODS: Objetivos de Desarrollo Sostenible

PW: Petavatio

PWh: Petavatio hora-1

PV: Sistema solar fotovoltaico

RPM: Revoluciones por minuto

RED: Recursos energéticos distribuidos

SWT: Turbinas eólicas pequeñas

1 | Introducción



1. Introducción

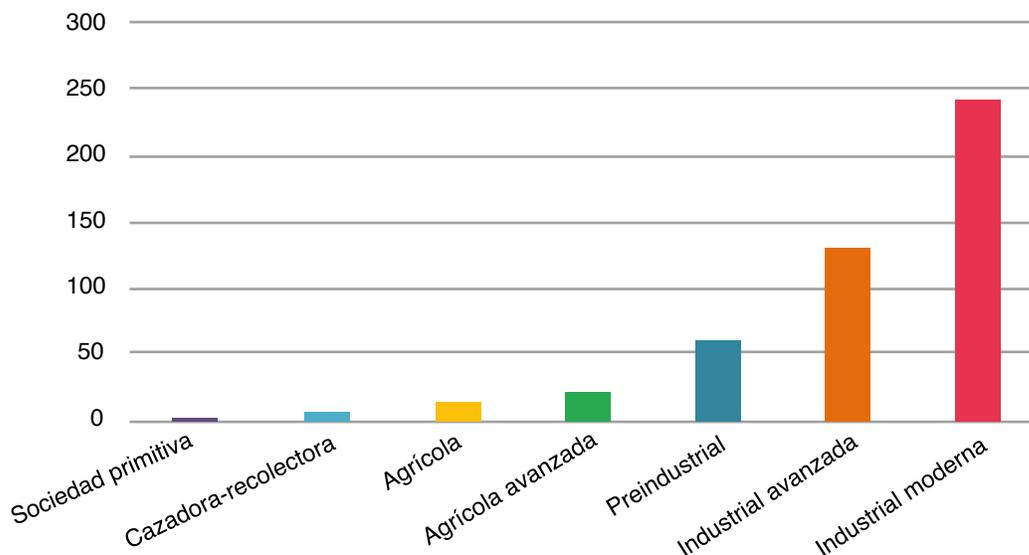
A lo largo de la historia el consumo energético ha sido uno de los aspectos distintivos en el desarrollo de las sociedades humanas, ya que, al mismo tiempo que estas desarrollan nuevos modelos de producción y surgen nuevas formas de gasto, la intensidad de dicho consumo se incrementa.

De acuerdo con Cunningham (2003):

La historia del hombre es la historia de la búsqueda permanente de fuentes de energía y de sus formas de aprovechamiento, con el propósito humano de servirse del ambiente. En su devenir la humanidad ha ido generando distintos modelos energéticos (preagrícola, agrícola, agrícola avanzado, preindustrial, industrial e industrial avanzado) que tienen un denominador común, ya que están condicionados por sus fuentes de energía y su aprovechamiento. Además, siempre que se pasó de un modelo a otro se ha registrado un incremento del consumo de energía per cápita así como de su consumo global.

Desde la revolución industrial hasta nuestros días el uso de la energía en los ámbitos doméstico, industrial, agrícola y del transporte ha mostrado un crecimiento exponencial, mientras que el consumo de alimentos se ha incrementado, pero con una disminución en su participación relativa.

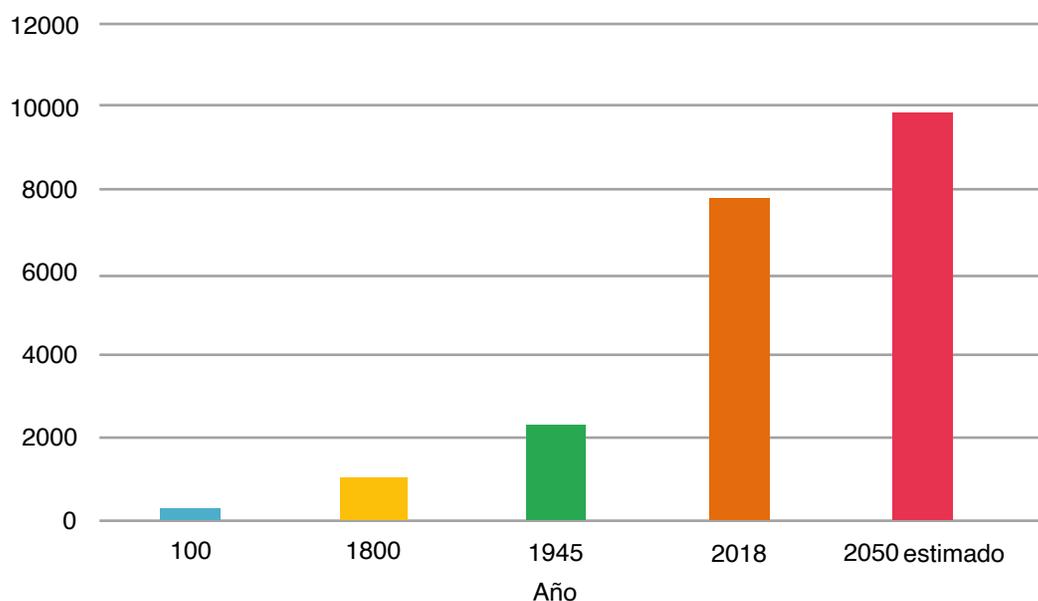
ILUSTRACIÓN 1. CONSUMO DE ENERGÍA Y EVOLUCIÓN EN MILES DE KCAL/PERSONA/DÍA.



Fuente: Elaborado con base en Cunningham 2003.

A medida que el consumo per cápita de energía se ha incrementado a través de la historia, también lo ha hecho la población mundial, que registra un aumento de 7350 millones de personas entre el siglo I y la actualidad.

ILUSTRACIÓN 2. EVOLUCIÓN DE LA POBLACIÓN HUMANA EN EL MUNDO (EN MILLONES DE HABITANTES).



El incremento constante de la población y del consumo de energía per cápita ha generado una creciente presión por la obtención de los recursos para generar energía. Además, el acceso a la energía se considera tan importante que constituye uno de los Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS) de la Organización de las Naciones Unidas: en el ODS 7 se expresa la necesidad de “Garantizar el acceso universal a una energía asequible, segura, sostenible y moderna, para mejorar las condiciones de vida de millones de personas” (ONU s.f.).

En nuestros días el acceso a la energía es un aspecto básico de la vida moderna, ya que permite llevar a cabo actividades económicas que generan valor y mejoran la calidad de vida de las personas por medio del esparcimiento y el ocio, así como satisfacer necesidades elementales como el acceso a los alimentos y su adecuada refrigeración, cocción, etc.

La energía utilizada para satisfacer las necesidades humanas proviene de diferentes fuentes, clasificadas en:

- No renovables, que son los combustibles fósiles y minerales almacenados cuyas reservas se agotan, entre ellos, el petróleo, el gas y el carbón; y
- Renovables¹, provenientes de recursos relacionados con los ciclos naturales del planeta, los cuales son inagotables en términos humanos, como el sol, el viento, el agua, la biomasa, el calor del interior de la tierra, etc.

Tanto las fuentes renovables como las no renovables están sujetas a un proceso de transformación en energía secundaria o final, a fin de obtener electricidad, calor y combustibles líquidos y gaseosos, entre otros, para su consumo.

¹ El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) (2011) define formalmente a la energía renovable como “Cualquier forma de energía de origen solar, geofísico o biológico que se renueva mediante procesos naturales a un ritmo igual o superior a su tasa de utilización. Se obtiene de los flujos continuos o repetitivos de energía que se producen en el entorno natural y comprende tecnologías de baja emisión de carbono, como la energía solar, la hidroeléctrica, la eólica, la mareomotriz y del oleaje, y la energía térmica oceánica, así como combustibles renovables tales como la biomasa”.

2

El rol de las energías renovables en la descarbonización



2. El rol de las energías renovables en la descarbonización

Durante la Vigésima Séptima Conferencia de las Partes en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, celebrada en Egipto, se invitó a pensar en las urgencias relativas a la crisis climática. Aunque la evidencia científica es contundente y constante, se deben tener en cuenta los grandes números asociados con el problema y las estrategias para abordarlo.

Cabe destacar que en la última alerta climática de la Organización Meteorológica Mundial (de agosto de 2022) se advierte sobre la creciente severidad de los fenómenos meteorológicos extremos y sus impactos, especialmente en el medio rural, con megasequías y precipitaciones extremas.

Las crecientes concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera están llevando al planeta a un terreno desconocido, ya que en la última década la frecuencia y la magnitud de los fenómenos meteorológicos extremos se han intensificado. Tras más de un siglo y medio de una economía basada en las energías fósiles, la temperatura del planeta ha aumentado en 1.1 °C, lo que ha intensificado las sequías, tormentas e inundaciones.

Según el Observatorio de la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica de los Estados Unidos, las concentraciones acumuladas de CO₂ en ppm se han incrementado tanto que en agosto de 2022 el planeta estaba a solo 33 ppm de superar los 450 ppm, lo que amplía considerablemente la probabilidad de un incremento de la temperatura global por encima de los 2 °C. En 1995, cuando se llevó a cabo la COP1, las emisiones acumuladas eran de 360 ppm, es decir, 57 ppm menos que los actuales 417 ppm.

De conformidad con el Global Monitoring Laboratory (2023), al ritmo en que aumenta la tasa de emisiones de GEI, en 15 años se superaría la barrera de los 450 ppm. En la reciente alerta del IPCC (2022b) se señala que los países retrasaron tanto la reducción de las emisiones de los combustibles fósiles que ya no pueden evitar que el calentamiento global se intensifique en los próximos 30 años, aunque aún se puede evitar un futuro más desafiante.

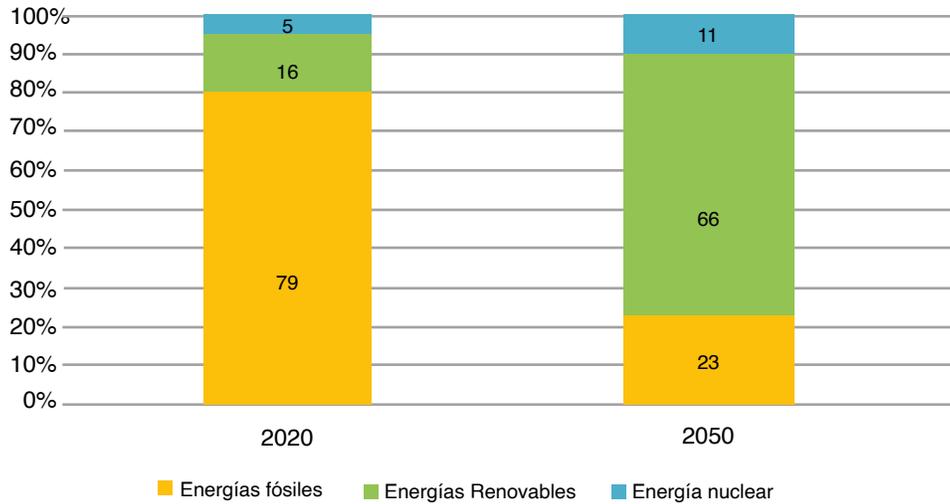
¿Cuál es el rol que el sector energético debe cumplir en la descarbonización para evitar este escenario? Antes que nada, se debe destacar que de la generación de energía se derivan aproximadamente las tres cuartas partes de las emisiones anuales de GEI, por lo que eliminar estas emisiones antes de 2050 resulta clave para evitar que la temperatura suba más de 1.5 oC.

En su informe Cero emisiones netas para 2050: una hoja de ruta para el sector energético mundial la Agencia Internacional de la Energía (AIE, 2021) indica que, para alcanzar el objetivo del Acuerdo de París de limitar el calentamiento a 1.5 oC, no se deben desarrollar nuevos yacimientos de fósiles ni construir nuevas centrales eléctricas de carbón. Además, se requiere una transformación integral de la producción, el transporte y la utilización de la energía, apuntando a medidas de eficiencia energética dirigidas a reducir el consumo energético en 7.5 % en 2050, en comparación con el de 2020.

Asimismo, cabe mencionar que, para lograr emisiones netas neutras de GEI en el sector energético en 2050 se requieren nuevas tecnologías que aún no están en el mercado. Serán necesarias inversiones en baterías, hidrógeno y captura y almacenamiento de CO₂.

Una de las medidas más relevantes debiera ser la modificación drástica de la matriz de consumo mundial de energía, a través de la reducción de la participación de las energías fósiles del actual 79 % al 23 % en 2050 e incrementando la de las renovables del 26 % al 66 % durante ese mismo período.

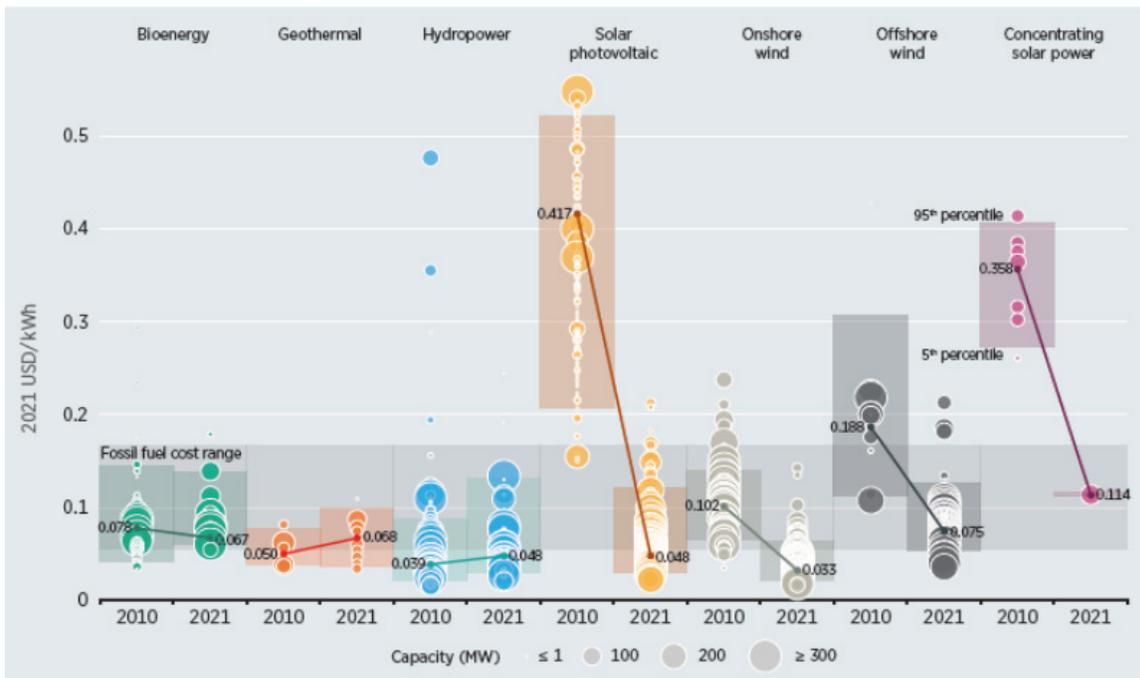
ILUSTRACIÓN 3. MATRIZ MUNDIAL DE CONSUMO DE ENERGÍA.



Fuente: Elaborado con base en AIE 2021.

Esta medida de masificar las energías renovables se aplica en un marco de fuertes reducciones en los costos de generación de las principales energías renovables (bioenergía, solar y eólica), las cuales las colocan en márgenes competitivos frente a las fósiles. Obviamente, las medidas impositivas sobre las emisiones de GEI (impuesto sobre las emisiones de dióxido de carbono y otras) serán fundamentales para masificar el uso de las energías renovables y promover su competitividad.

ILUSTRACIÓN 4. EVOLUCIÓN DE LOS COSTOS DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES FRENTE A LOS DE LAS FÓSILES.



Fuente: Tomado de IRENA 2022.

A pesar de que no constituye un escenario unívoco de acción, esta medida anunciada por la AIE muestra la magnitud de los desafíos para los años venideros.

El sector agrícola, que ya se está viendo gravemente afectado por el cambio climático, puede ofrecer bioenergías y tierras para el desarrollo de energías renovables, además de propiciar medidas de eficiencia energética; sin embargo, no solo el mundo rural, sino también el planeta entero sufre las consecuencias de dicho fenómeno: según el IPCC (2022a), cuatro de cada diez personas son vulnerables al cambio climático, es decir, más de 3300 millones de personas.

A continuación, se describe detalladamente el escenario de cero emisiones de la AIE, haciendo hincapié en el rol de las energías renovables, así como en la aplicación de distintas medidas. En el anexo 1 se muestran otros escenarios alternativos elaborados por la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA).

Escenario cero emisiones netas en 2050 (NZE) (AIE 2021)

En el informe *Prospectivas de la energía en el mundo*, elaborado por la AIE, se utiliza un enfoque de escenarios para examinar las futuras tendencias energéticas en torno a los procesos y esfuerzos implementados en el ámbito internacional para la descarbonización. Cada uno de los escenarios desarrollados se basa en un conjunto diferente de supuestos subyacentes sobre cómo podría evolucionar el sistema energético y los resultados esperados, dadas las presuntas configuraciones en el proceso de cambio climático; no obstante, como lo explica la AIE (2022), estos escenarios no son predicciones, puesto que no se puede disponer de una visión única y certera acerca de lo que podría deparar el futuro a largo plazo. Lo que se pretende con los escenarios es permitir una lectura comparativa de las posibles versiones del futuro, así como de las acciones que las producen, con el objetivo de estimular la concepción de ideas relativas al futuro de la energía mundial.

De acuerdo con la AIE (2022), estos escenarios se generan por medio de un modelo híbrido que combina componentes del Modelo Energético Mundial, utilizado en la elaboración de las previsiones del informe anual *Prospectivas de la energía en el mundo*, y el modelo Perspectivas Tecnológicas de la Energía. La combinación de ambos modelos permite elaborar un conjunto único de perspectivas sobre los mercados energéticos, la inversión, las tecnologías y las políticas necesarias para la transición hacia una energía limpia. En este sentido, la AIE modeló cuatro escenarios: 1) el NZE, 2) el escenario de compromisos anunciados, 3) el escenario de políticas declaradas y el 4) escenario de desarrollo sostenible (SDS).

El NZE está diseñado para mostrar qué requieren los diversos actores en los principales sectores y cuándo, a fin de que el mundo alcance en 2050 las emisiones netas de CO₂ relacionadas con la energía y los procesos industriales. Este logro es coherente con alrededor del 50 % de las posibilidades de limitar a largo plazo el aumento de la temperatura media mundial a 1.5 °C sin un exceso de temperatura (IPCC citado en AIE 2021). Para lograrlo, todos los Gobiernos tendrían que aumentar sus ambiciones con respecto a las actuales contribuciones determinadas a nivel nacional y a las promesas de reducción neta (AIE 2021).

Otro escenario al que se hace referencia en dicho informe es el SDS. Como vía “muy por debajo de los 2 °C”, este representa una puerta de entrada a los resultados previstos en el Acuerdo de París. Al igual que el NZE, el SDS se basa en un aumento de las políticas de energía limpia y de la inversión, el cual coloca al sistema energético en el camino de los principales ODS. En este escenario las promesas actuales de cero emisiones netas se alcanzan en su totalidad, se realizan grandes esfuerzos para lograr reducciones de emisiones a corto plazo y las economías avanzadas alcanzan las cero emisiones netas en 2050, China, en torno a 2060, y todos los demás países, a más tardar en 2070. Sin asumir ninguna emisión neta negativa, este escenario es coherente con la limitación del aumento de la temperatura global a 1.65 °C (con una probabilidad del 50 %). Con algún nivel de emisiones netas negativas después de 2070, el aumento de la temperatura podría reducirse a 1.5 °C en 2100 (AIE 2021).

En el NZE se señala que existen muchas vías para conseguir emisiones netas de CO₂ en todo el mundo para 2050, así como mucha incertidumbre que podría afectar a cualquiera de ellas; por tanto, se describe solo una vía y no el camino hacia las cero emisiones netas. Elementos como el ritmo de innovación de las tecnologías nuevas y emergentes, la medida en que los ciudadanos están dispuestos a cambiar de comportamiento, la disponibilidad de bioenergía sostenible y el alcance y la eficacia de la colaboración internacional son elementos móviles e impredecibles (AIE 2021). Considerando lo anterior, para modelar el escenario se toman en cuenta los siguientes supuestos:

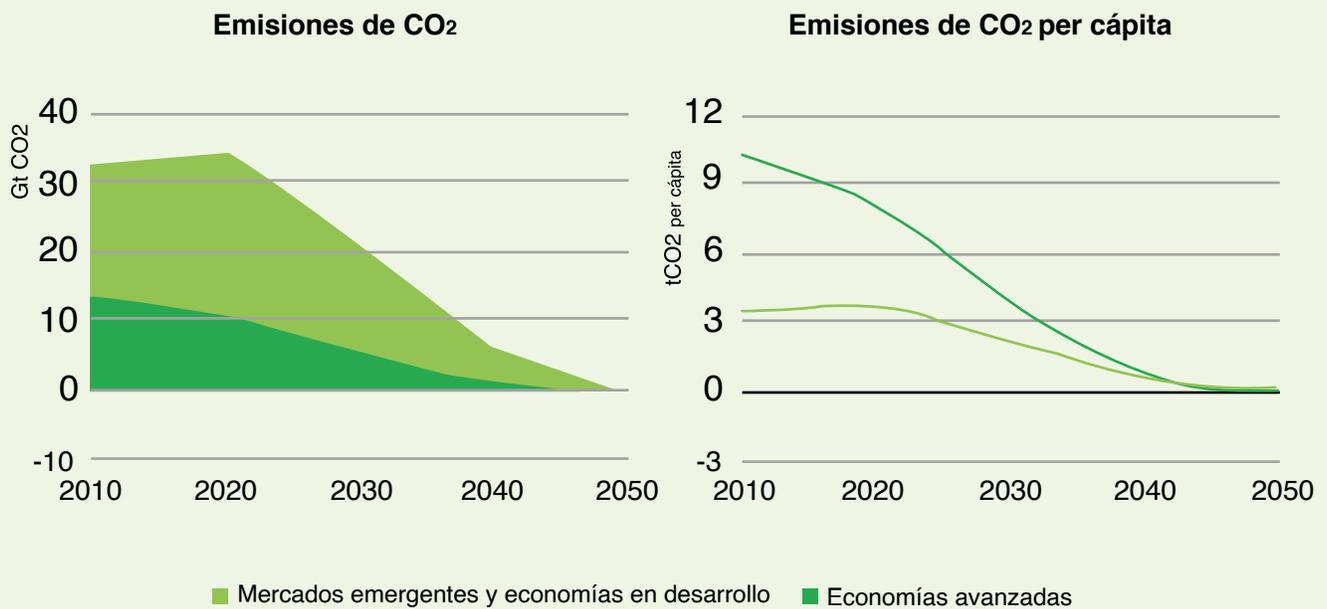
*La adopción de todas las tecnologías y opciones de reducción de emisiones disponibles depende de los costos, la madurez de la tecnología, las preferencias políticas y las condiciones del mercado y del país.

*Todos los países cooperan para lograr las cero emisiones netas en todo el mundo, lo que implica que todos ellos deben participar en los esfuerzos dirigidos a alcanzar dicho objetivo, colaborando de forma eficaz y mutuamente beneficiosa y reconociendo las diferentes etapas de desarrollo económico de los países y las regiones, así como la importancia de garantizar una transición justa.

*Se debe llevar a cabo una transición ordenada en todo el sector energético, lo que incluye garantizar el suministro de combustible y electricidad en todo momento, minimizar los activos varados cuando sea posible y evitar la volatilidad de los mercados energéticos.

Según el escenario NZE, las emisiones mundiales de CO₂ relacionadas con la energía y los procesos industriales se reducen en casi 40 % entre 2020 y 2030 hasta llegar al cero neto en 2050, a la vez que, paralelamente, se consigue el acceso universal a la energía sostenible en 2030. Estos cambios se producen mientras que la economía mundial se duplica hasta 2050 y la población mundial presenta un aumento de 2000 millones. En este contexto, energías renovables como la eólica y la solar, junto con la eficiencia energética, desempeñan un rol fundamental de descarbonización, propiciando cerca de la mitad del ahorro de emisiones hasta 2030. Si bien es cierto que a posteriori estas seguirán cumpliendo dicha labor, en el período consuetudinario hasta el año de referencia (2050), otras tecnologías como el hidrógeno verde, el aumento de la electrificación y el despliegue de tecnologías de captura, uso y almacenamiento de carbono (CUAC), además de otras tecnologías en investigación por examinar, facilitarían más de la mitad del ahorro de emisiones entre 2030 y 2050 (véase la ilustración 6) (AIE 2021).

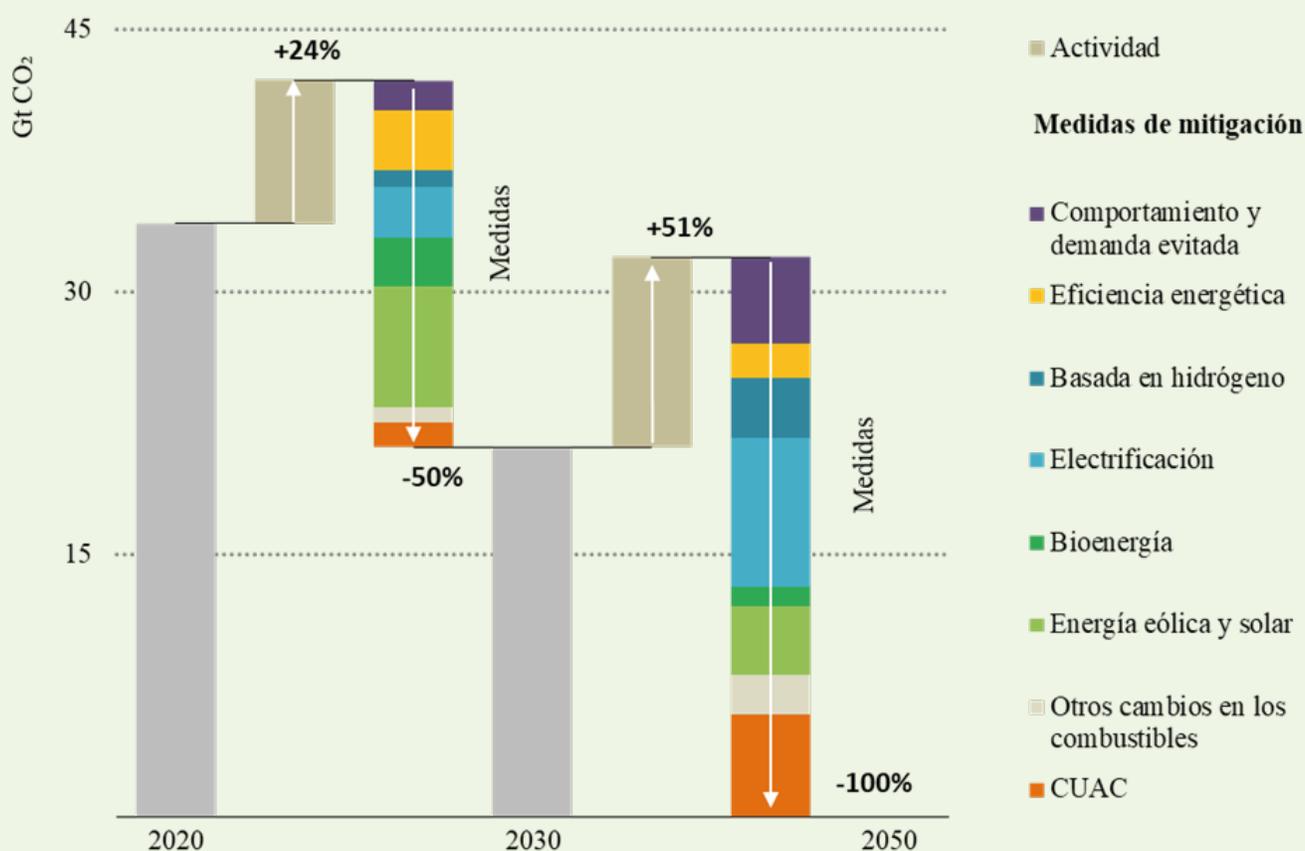
ILUSTRACIÓN 5. EMISIONES GLOBALES NETAS DE CO2 DEL NZE.



Fuente: Elaborado con base en AIE 2021.

En el año de referencia (2020) el petróleo proporcionaba el 30 % del suministro total de energía, el carbón, el 26 %, y el gas natural, el 23 %; sin embargo, según el escenario, en 2050 las energías renovables representarán dos tercios del uso de la energía, repartidos entre la bioenergía y las energías eólica, solar, hidroeléctrica y geotérmica. Además, se presenta un gran aumento en el suministro de energía nuclear, que casi se duplica entre 2020 y 2050 (AIE 2021). De conformidad con las previsiones anteriores, se espera que en 2050 cerca del 90 % de la generación de la electricidad proceda de energías renovables tradicionales, combustibles y tecnologías emergentes (p. ej., las de hidrógeno y combustibles basados en este, la bioenergía y las CUAC). Estas últimas desempeñarán un papel especialmente importante en aquellos sectores en los que las emisiones suelen ser más difíciles de reducir.

ILUSTRACIÓN 6. REDUCCIÓN DE EMISIONES MEDIANTE MEDIDAS DE MITIGACIÓN EN EL NZE DURANTE EL PERÍODO 2020-2050.



EN EL NZE LAS ENERGÍAS SOLAR Y EÓLICA Y LA EFICIENCIA ENERGÉTICA REPRESENTAN ALREDEDOR DE LA MITAD DE LAS REDUCCIONES DE EMISIONES HASTA 2030, MIENTRAS QUE LA ELECTRIFICACIÓN, LA TECNOLOGÍA CUAC Y EL HIDRÓGENO AUMENTAN SU INFLUENCIA A PARTIR DE ENTONCES.

Nota:

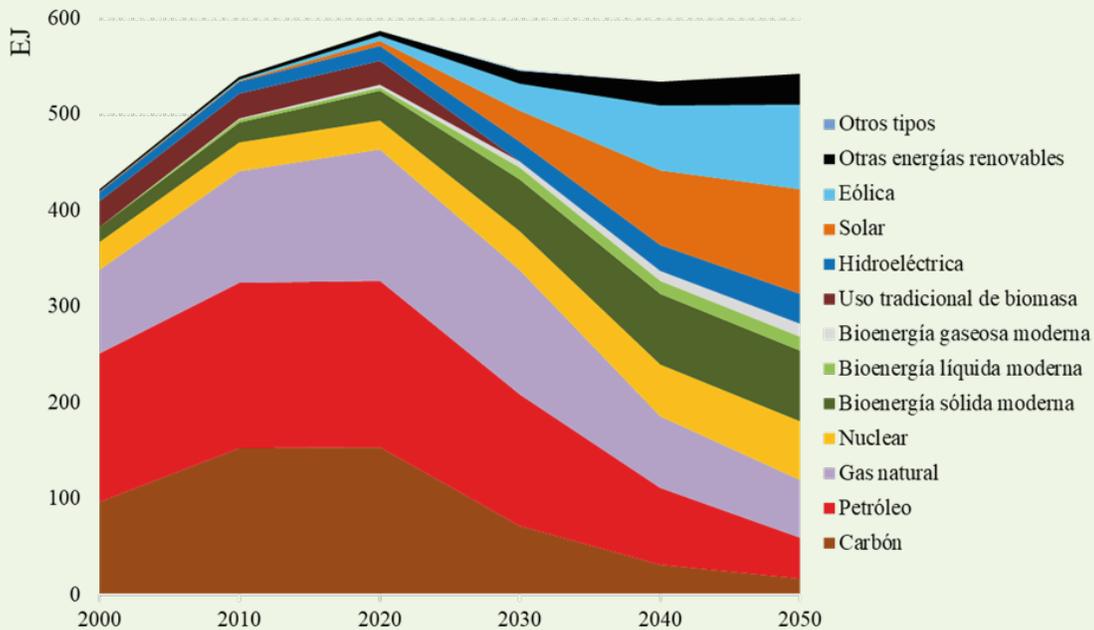
Actividad = cambios en la demanda de servicios energéticos por el crecimiento económico y demográfico. Comportamiento = energía.

Fuente: Elaborado con base en AIE 2021.

Este proceso debe ser visualizado sectorialmente, considerando que las energías renovables tendrán una función importante en la reducción de las emisiones de los edificios, la industria y el transporte. En el sector del transporte se prevé la aplicación de la estrategia de descarbonización, a través de mecanismos de transmisión indirecta, bajo el paradigma de la electromovilidad y, directa, por medio de la normación y el fomento del uso de biocombustibles líquidos y biometano. Por otra parte, en los edificios, las energías renovables se utilizarían principalmente en la calefacción del agua y los espacios. El uso directo de las energías renovables pasaría de alrededor del 10 % de la demanda de calefacción en todo el mundo en 2020 al 40 % en 2050. Aproximadamente tres cuartas partes de este aumento se producirían en forma de energías solar térmica y geotérmica.

En la industria la bioenergía es la fuente de energía renovable directa más importante para satisfacer las necesidades de baja y media temperatura en el NZE, mientras que las energías solar térmica y geotérmica se emplean en la producción de calor a baja temperatura para su aprovechamiento en industrias no intensivas en energía y procesos auxiliares o posteriores en industrias pesadas. La bioenergía, la energía solar térmica y la energía geotérmica proporcionarían conjuntamente alrededor del 15 % de la demanda de calor de la industria en 2030, esto es, cerca del doble de su cuota en 2010, lo que aumentaría hasta el 40 % en 2050. El uso indirecto de la energía renovable mediante la electricidad añadiría 15 % a la contribución de las energías renovables al uso total de la energía en la industria en 2050 (AIE 2021).

ILUSTRACIÓN 7. OFERTA ENERGÉTICA TOTAL EN EL NZE.

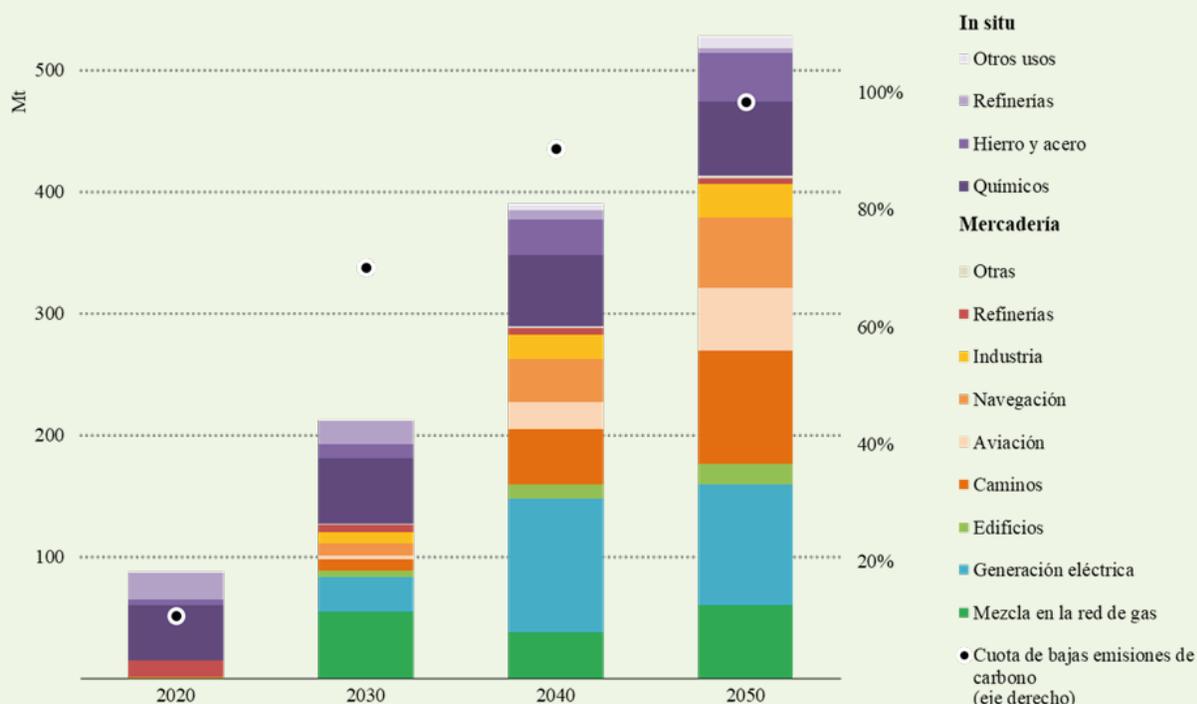


EN EL NZE LAS ENERGÍAS RENOVABLES Y LA NUCLEAR DESPLAZARÍAN A LA MAYORÍA DE LAS GENERADAS CON COMBUSTIBLES TRADICIONALES, MIENTRAS QUE LA PARTICIPACIÓN DE LOS COMBUSTIBLES FÓSILES DEL 80 % EN 2020 PASARÍA HASTA POCO MÁS DE 20 % EN 2050.

Fuente: Elaborado con base en AIE 2021.

Como se ha señalado anteriormente, aparte de la función sustancial que cumplen las energías renovables tradicionales, en el escenario NZE el hidrógeno verde y la bioenergía conducirían el proceso de transformación energética durante la segunda etapa del período 2020-2050. La AIE (2021) puntualiza que, en dicho escenario, el enfoque inicial de uso del hidrógeno es la conversión de los usos actuales de la energía fósil en hidrógeno bajo en carbono, a fin de que no se requiera inmediatamente una nueva infraestructura de transmisión y distribución. Esto incluye el uso de hidrógeno en la industria, las refinerías y las centrales eléctricas, así como la mezcla de hidrógeno en el gas natural para su distribución a los usuarios finales. El uso mundial de hidrógeno pasaría de menos de 90 Mt en 2020 a más de 200 Mt en 2030. La proporción de hidrógeno bajo en carbono aumentaría del 10 % en 2020 al 70 % en 2030. Alrededor de la mitad del hidrógeno bajo en carbono producido en todo el mundo en 2030 procedería de la electrólisis y el resto del carbón y el gas natural, con CUAC. Durante la década de 2020 también se produciría un gran aumento en la instalación de equipos de uso final de hidrógeno, lo que incluiría a más de 15 millones de vehículos de pila de combustible de hidrógeno en la carretera en 2030 (AIE 2021).

ILUSTRACIÓN 8. USO GLOBAL DE HIDRÓGENO O COMBUSTIBLE A BASE DE HIDRÓGENO EN EL NZE.



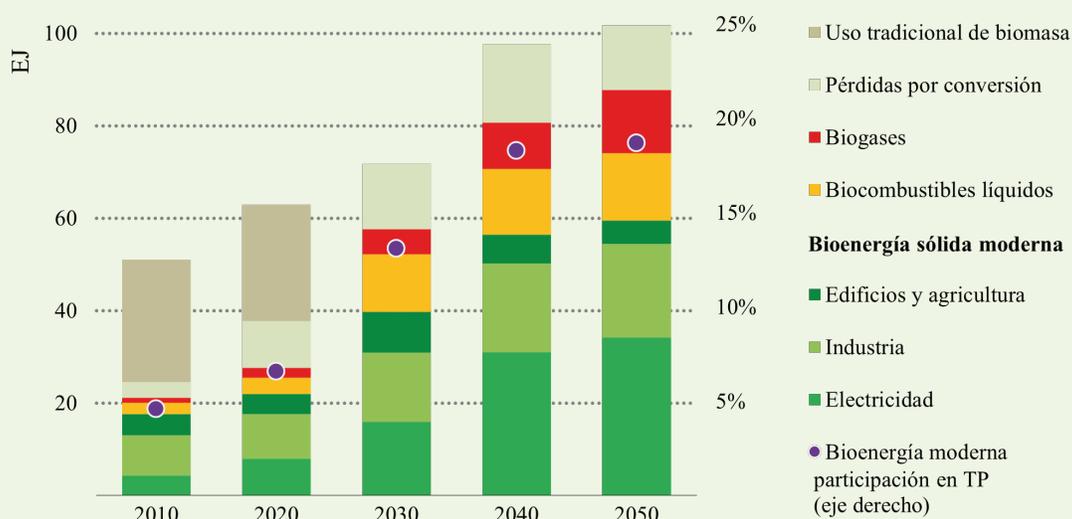
EN UN ENFOQUE INICIAL SE CAMBIA EL USO DEL HIDRÓGENO BAJO EN CARBONO PARA QUE EL HIDRÓGENO Y LOS COMBUSTIBLES A BASE DE ÉL SE INCLUYAN EN TODOS LOS USOS FINALES.

Fuente: Elaborado con base en AIE 2021.

Después de 2030 el uso del hidrógeno bajo en carbono se expande rápidamente en todos los sectores del NZE. En el sector eléctrico el hidrógeno y los combustibles basados en él constituirían una importante fuente de flexibilidad del sistema eléctrico con bajas emisiones de carbono. Aunque estos combustibles representarían solo cerca del 2 % de la generación total de electricidad en 2050, se trata de volúmenes muy grandes de hidrógeno, por lo que el sector eléctrico se convertiría en un importante impulsor de la demanda. En el sector del transporte en 2050 el hidrógeno representaría alrededor de un tercio del uso de combustible en camiones, mientras que, en el transporte marítimo en ese mismo año más del 60 % del consumo total de combustible debería provenir de esta fuente para que se cumplan los objetivos de descarbonización.

Con respecto a la bioenergía, en el escenario NZE se producirían dos tendencias a la inversa. En 2030 el uso de la biomasa sólida se reduciría a cero, en detrimento del empleo de la bioenergía moderna, alejándose de la demanda de casi 90 % de biomasa sólida insostenible de 2020. El aumento de todas las formas de bioenergía moderna compensaría lo anterior con creces, ya que la producción pasaría de menos de 40 EJ en 2020 a unos 100 EJ en 2050. Asimismo, en 2050 toda la bioenergía procedería de fuentes sostenibles y las cifras del NZE de uso total de bioenergía estarían muy por debajo de las estimaciones del potencial mundial de bioenergía sostenible, lo que evitaría el riesgo de impactos negativos en la biodiversidad, los sistemas de agua dulce, los precios y la disponibilidad de alimentos (AIE 2021).

ILUSTRACIÓN 9. OFERTA TOTAL DE BIOENERGÍA EN EL NZE.



Fuente: Elaborado con base en AIE 2021.

De acuerdo con las valoraciones del escenario, el uso de la bioenergía sólida moderna aumentaría en promedio casi 3 % cada año hasta 2050. En el sector eléctrico la bioenergía sólida facilitaría una generación flexible de bajas emisiones para complementar la generación a partir de energía solar fotovoltaica y eólica y eliminaría el CO₂ de la atmósfera cuando esté equipada con CUAC. En 2050 la generación de electricidad con combustibles bioenergéticos alcanzaría los 3300 TWh, es decir, el 5 % de la generación total. Además, la bioenergía proporcionaría alrededor del 50 % de la producción urbana de calor. En la industria, donde la demanda alcanzaría los 20 EJ en 2050, la bioenergía sólida proporcionaría calor a alta temperatura y se podría cocinar con carbón para reducir la intensidad de las emisiones de los activos de generación existentes (AIE 2021).

En cuanto a otras formas bioenergéticas como el biogás, la demanda de biometano aumentaría a 8.5 EJ, en virtud de los mandatos de mezcla dirigidos a las redes de gas, con tasas medias de mezcla que en 2050 superarían el 80 % en muchas regiones. La mitad del uso total de biometano correspondería al sector industrial, en el que el biometano sustituiría al gas natural como fuente de calor de proceso. En 2050 los sectores de la construcción y el transporte representarían cada uno 20 % más del consumo de biometano. En el caso de los biocombustibles líquidos, el consumo pasaría de 1.6 mboe/d en 2020 a 6 mboe/d en 2030, principalmente en el transporte por carretera. Después de 2030 los biocombustibles líquidos crecerían más lentamente hasta alcanzar unos 7 mboe/d en 2050 y su uso se desplazaría hacia el transporte marítimo y la aviación, ya que se espera que el paradigma de la electromovilidad domine cada vez más el transporte por carretera. En 2050 casi la mitad del uso de biocombustibles líquidos se destinaría a la aviación, en la que el bioqueroseno representaría alrededor del 45 % del uso total de combustible en los aviones (AIE 2021).

Evolución de la mano de obra

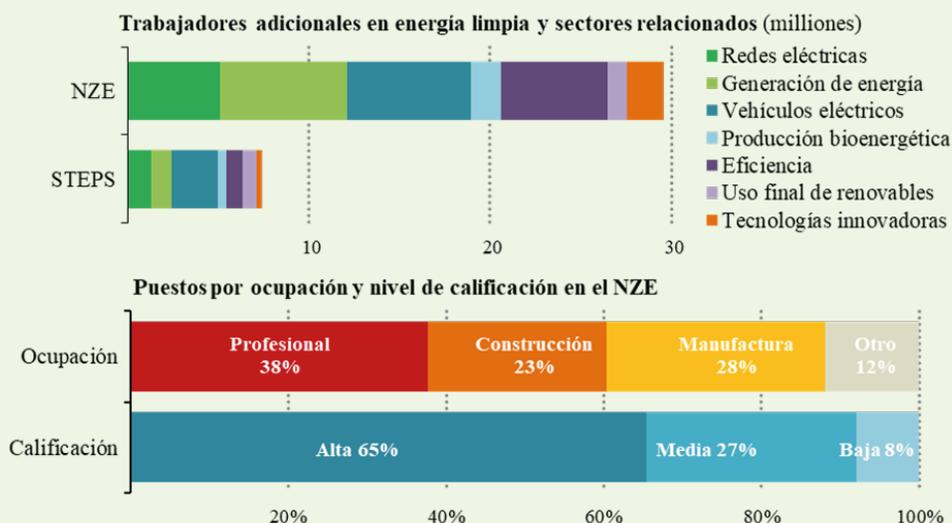
Otra variable para tener en cuenta dentro del proceso de transición energética es la transformación de los mercados laborales frente a la progresiva coyuntura. De acuerdo con la AIE (2021), en el sector de la energía el empleo se modifica notablemente en respuesta a los cambios en la inversión y el gasto en energía. En el NZE los puestos de trabajo en las energías limpias aumentarían a 14 millones hasta 2030, mientras que en el suministro de combustible de petróleo, gas y carbón y en las

centrales eléctricas disminuirían a casi 5 millones, lo que supone un aumento neto de cerca de 9 millones de puestos de trabajo. Como punto de referencia, la AIE (2021) toma su propio cálculo de 2020, de cerca de 40 millones de trabajadores directos en todo el mundo en las industrias de petróleo, gas, carbón, energías renovables, bioenergía y redes energéticas.

En el escenario NZE, además de los 14 millones de nuevos puestos de trabajo en el sector de las energías limpias, se generarían indirectamente nuevos puestos, debido a las modificaciones del gasto en electrodomésticos más eficientes, vehículos eléctricos y de pila de combustible, la readaptación de edificios y la producción de eficiencia energética. Estos cambios requerirían otros 16 millones de trabajadores, lo que significa que en 2030 habría 30 millones más de personas trabajando en los ámbitos de las energías limpias, la eficiencia energética y las tecnologías de bajas emisiones. La inversión en la generación de electricidad, las redes eléctricas, la fabricación de vehículos eléctricos y la eficiencia energética son algunas de las áreas que abrirán nuevas oportunidades de empleo; p. ej., los empleos en la producción de energías solar y eólica se multiplicarían por más de cuatro con respecto a los niveles actuales. En 2030 casi dos tercios de los trabajadores de estos sectores estarían altamente cualificados y la mayoría requeriría una formación importante. Además, con la duplicación de la inversión total en energía, surgirían nuevas oportunidades de empleo en áreas asociadas como el comercio mayorista y los servicios financieros y legales (AIE 2021).

Los nuevos puestos de trabajo creados en el NZE tenderían a presentar una mayor flexibilidad geográfica y una distribución más amplia que la actual. Alrededor del 40 % estaría constituido por puestos de trabajo ubicados cerca del lugar donde se realiza el trabajo, p. ej., la mejora de la eficiencia de los edificios o la instalación de turbinas eólicas, mientras que el resto estaría conformado por puestos de trabajo vinculados a los centros de fabricación. El rápido aumento en la demanda de tecnologías energéticas limpias requeriría la puesta en marcha de nuevas capacidades de producción que podrían estar ubicadas en cualquier región. Aquellos países y empresas que se adelantaran podrían disfrutar de ventajas estratégicas para captar la floreciente demanda (AIE 2021).

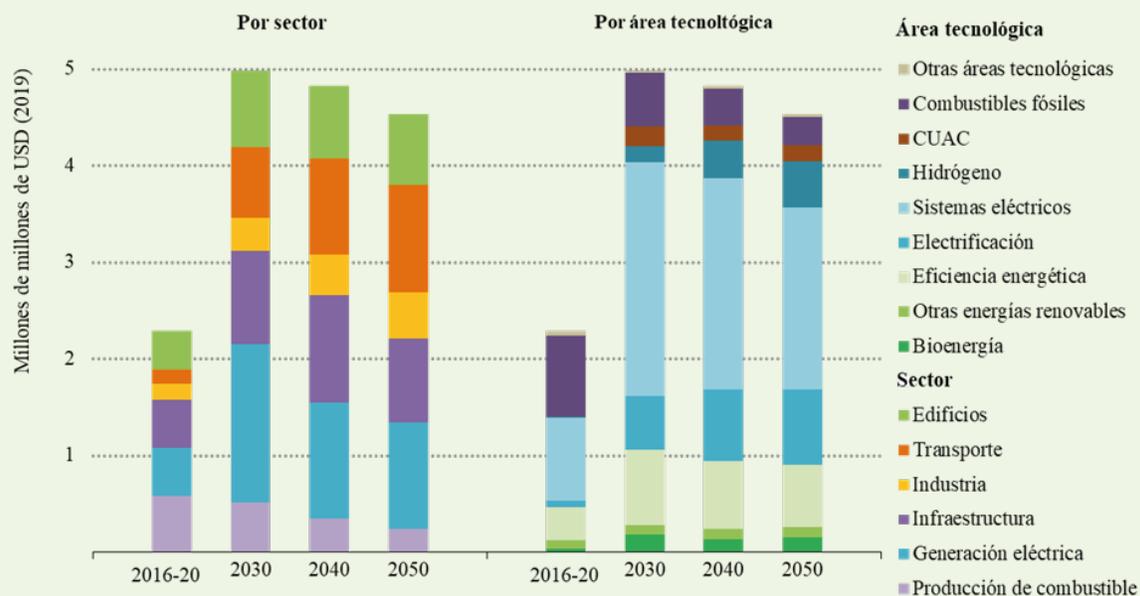
ILUSTRACIÓN 10. NUEVOS TRABAJADORES EN EL ÁREA DE LA ENERGÍA LIMPIA Y SECTORES RELACIONADOS, RATIOS DE CALIFICACIÓN LABORAL Y OCUPACIÓN EN EL NZE Y EL STEPS EN 2030.



Fuente: Elaborado con base en AIE 2021.

La AIE (2021) aclara que, en todo el mundo, la inversión anual en el sector energético, que en los últimos años ha sido en promedio de USD 2.3 billones, en 2030 se dispararía hasta los USD 5 billones, siguiendo los requerimientos del NZE. Como porcentaje del producto interno bruto (PIB) mundial, la inversión anual media en energía hasta 2050 en el NZE sería aproximadamente 1 % superior a la de los últimos años. La transición hacia las cero emisiones netas en 2050 requiere un aumento sustancial de la inversión en electricidad, infraestructuras y sectores de uso final. En este caso el sector que concentraría mayor crecimiento en la inversión sería el de la generación de electricidad, que pasaría de USD 0.5 billones anuales en los últimos cinco años a USD 1.6 billones en 2030. En 2030 la inversión anual en energías renovables en el sector eléctrico sería de unos USD 1.3 billones, un poco más que el nivel más alto jamás gastado en el suministro de combustibles fósiles (USD 1.2 billones en 2014) (AIE 2021).

ILUSTRACIÓN 11. PROMEDIO ANUAL DE INVERSIÓN EN CAPITAL EN EL NZE.



LAS INVERSIONES DE CAPITAL EN ENERGÍA AUMENTARÍAN DEL 2.5 % DEL PIB EN LOS AÑOS RECIENTES AL 4.5 % DEL PIB EN 2030. LA MAYORÍA DEL DESEMBOLSO SE EFECTUARÍA EN LA GENERACIÓN ELÉCTRICA Y EN LAS REDES Y LOS EQUIPOS ELÉCTRICOS PARA USUARIOS FINALES.

Fuente: Elaborado con base en AIE 2021.

Por otra parte, la inversión anual en infraestructuras de energía limpia aumentaría de unos USD 290 000 millones en los últimos cinco años a unos USD 880 000 millones en 2030. Las principales estructuras que canalizarían capital serían las redes eléctricas, las estaciones públicas de recarga de vehículos eléctricos, las estaciones de repostaje de hidrógeno, las terminales de importación y exportación, las tecnologías de captura directa de aire, las tuberías de CO₂ y las instalaciones de almacenamiento; no obstante, después de 2030, la inversión anual en generación de electricidad se reduciría en un tercio hasta 2050. Gran parte de la infraestructura para un sector eléctrico de bajas emisiones se establecería en la primera década del NZE, mientras que el costo de las energías renovables seguiría disminuyendo luego de 2030. En los sectores de uso final se produciría un aumento continuo en la inversión en vehículos eléctricos, la CUAC y el uso de hidrógeno en la industria y el transporte, así como en edificios y aparatos más eficientes (AIE 2021).

3

Energías renovables y sistemas de generación eléctrica con fuentes renovables: aplicaciones en el mundo rural, tecnologías y desafíos



3. Energías renovables y sistemas de generación eléctrica con fuentes renovables: aplicaciones en el mundo rural, tecnologías y desafíos²

3.1 Energías renovables y electrificación rural

El escaso o nulo acceso a la energía de las poblaciones rurales constituye un problema de escala mundial. De acuerdo con el Banco Mundial (2017), en 2014 solo el 73.03 % de la población rural de todo el mundo tenía acceso a la electricidad, mientras que en América Latina y el Caribe (ALC) 17 millones de personas no tienen acceso a dicha forma de energía, siendo las poblaciones rurales las más afectadas (CEPAL 2022). Con respecto a las desigualdades en el área geográfica, como se puede observar en la ilustración 13, en todos los quintiles de ingreso son los habitantes de las zonas rurales quienes cuentan con un menor acceso a la electricidad. Históricamente, sobre todo en los años setenta y ochenta, los países han puesto en marcha programas de electrificación rural, por lo general a partir de la extensión de la red nacional de electricidad (Van Campen et al. 2000). Aunque en algunos casos estos han dado muy buenos resultados y han transformado las zonas rurales, en otros su éxito ha sido muy relativo. La electrificación rural constituye un desafío debido a ciertos factores específicos:

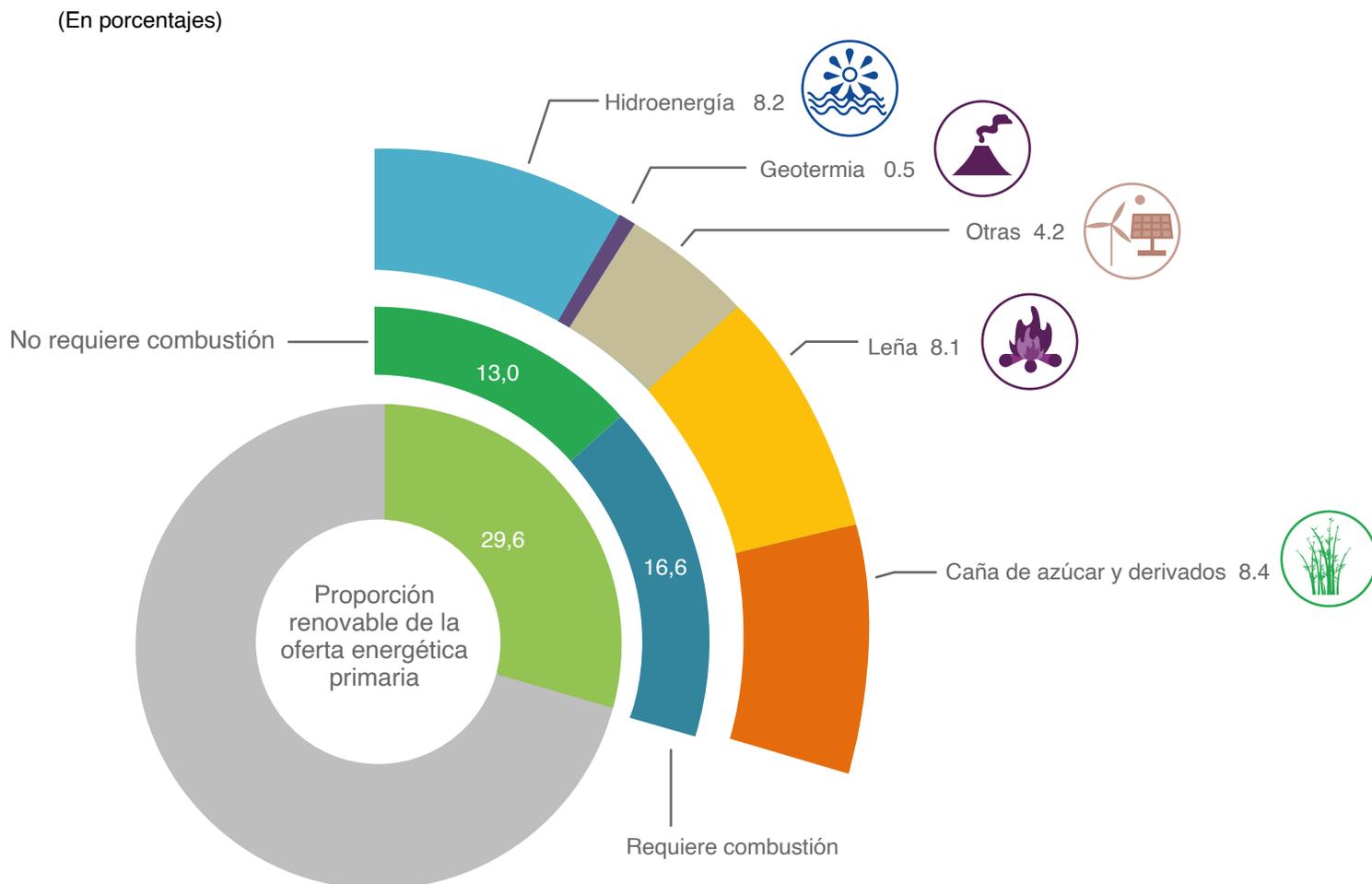
- La gran dispersión de los consumidores potenciales y, por ende, la poca demanda;
- La concentración de esa demanda en un breve período del día (por lo general en las primeras horas de la noche), que conduce a un volumen máximo relativamente elevado y a una escasa carga;
- La gran pérdida de energía (hasta del 25 %), incluso por robo;
- El limitado poder para la compra de electricidad y electrodomésticos por parte de los consumidores; y
- La dificultad en términos de facturación, mantenimiento y servicio.

Aunque resulta versátil una vez instalada, la electrificación rural a través de la red ordinaria constituye la inversión más costosa en energía y, en principio, todas las necesidades de electricidad que se pueden atender con la extensión de dicha red se pueden satisfacer también con una mezcla adecuada de opciones de suministro de energía renovable (fotovoltaica, eólica y derivada de la biomasa y el biogás, entre otras) (Schramm 1993). En la búsqueda de opciones de electrificación rural menos costosas, cada vez más se toman en cuenta las relativas a la energía descentralizada.

Entre 1970 y 2019 la oferta energética primaria no renovable se multiplicó por 2.3, mientras que, durante ese mismo período, la oferta energética primaria renovable se multiplicó por 2.87 veces, cubriendo el 29.6 % de la oferta energética primaria de ALC (hidroenergías, geotermia, leña y caña de azúcar y sus derivados, entre otras).

² Se agradecen los aportes de Francisco Della Vecchia del Centro de Estudios de la Actividad Regulatoria Energética de la Universidad de Buenos Aires por sus aportes para los capítulos 4 a 6 de la presente publicación.

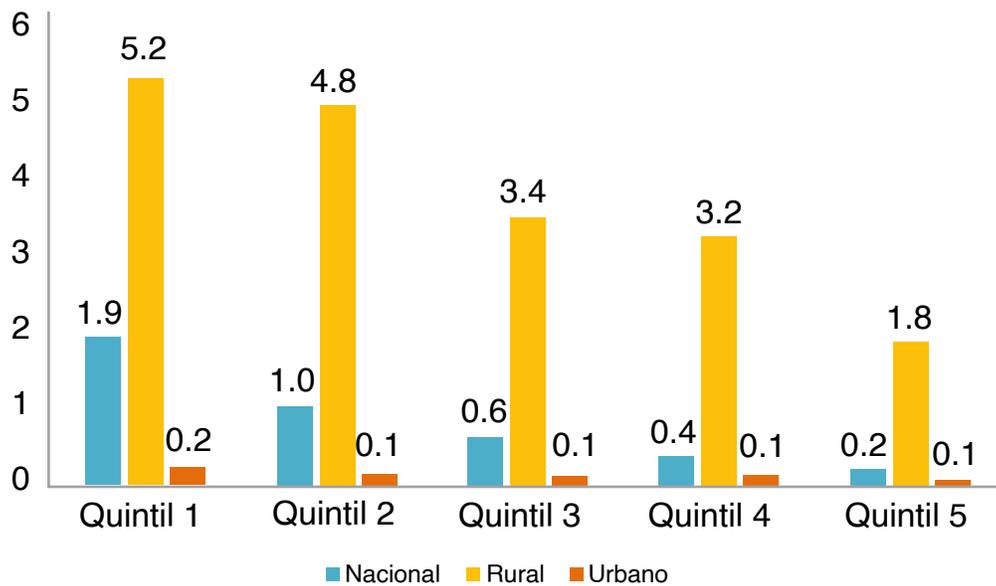
ILUSTRACIÓN 12. ALC: OFERTA ENERGÉTICA PRIMARIA RENOVABLE POR RECURSO ENERGÉTICO (2019).



Fuente: Tomado de CEPAL 2021.

Según la AIE (2016), el 23 % de la producción mundial de electricidad proviene de fuentes renovables. En el caso de ALC, el potencial de generación con dichas fuentes supera la demanda esperada para 2050. De acuerdo con la Organización Latinoamericana de Energía, es posible ejecutar proyectos de electrificación con fuentes renovables en comunidades rurales, con soluciones en favor del desarrollo sostenible y el progreso de sus habitantes (Arias 2017). Además del acceso nulo a la electricidad, estas comunidades comparten otras características: se trata de poblaciones muy dispersas, con desventajas comparativas y competitivas, conflictividad social y un escaso desarrollo económico y social.

ILUSTRACIÓN 13. AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE: PROPORCIÓN DE LA POBLACIÓN SIN ACCESO A ELECTRICIDAD POR QUINTILES DE INGRESO (RURAL, URBANO Y TOTAL), ÚLTIMO AÑO DISPONIBLE.



Nota: Último año disponible: Bolivia, Brasil, Chile, Colombia, Costa Rica, Ecuador, El Salvador, Paraguay, Perú y Uruguay, 2017; Honduras, México y República Dominicana, 2016; Guatemala, Nicaragua y Venezuela, 2014.

Fuente: Tomado de CEPAL 2022.

Las fuentes de energías renovables permitirían dar acceso universal a la electricidad a todos los pobladores de la región, mitigar el deterioro ambiental por medio de la utilización de tecnología energéticamente eficiente, reducir las condiciones de pobreza y la vulnerabilidad al cambio climático y lograr una mayor participación de empresas cercanas a las comunidades mediante la responsabilidad social corporativa (Arias 2017). En la actualidad constituyen la primordial y urgente respuesta para alcanzar la meta del Acuerdo de París y cumplir con los compromisos mundiales en torno a la mitigación de los efectos del cambio climático.

3.2 Tecnologías renovables para el mundo rural

Según Schramm (1993), la electrificación a través de la red ordinaria constituye la inversión más costosa en términos energéticos y en el medio rural todas las necesidades de electricidad se pueden satisfacer con una combinación adecuada de opciones de suministro de energía renovable (fotovoltaica, eólica, minihidroeléctrica y a base de biogás, biomasa, bioetanol y biodiésel). Las energías renovables permiten instalar recursos energéticos distribuidos (DER)³ conectados a la red (*on-grid*) o aislados (*off-grid*) para el autoconsumo o su gestión, además de ofrecer servicios al sistema eléctrico, si se dispone de puntas de línea de media y baja tensión.

³ Entre los DER se incluyen principalmente las energías renovables de pequeña y mediana escala, la eficiencia energética, los sistemas físicos y virtuales de almacenaje, la gestión de la demanda y el vehículo eléctrico.

El presente capítulo se focaliza en tres tecnologías de generación de electricidad a partir de las fuentes renovables 1) solar fotovoltaica, 2) eólica y 3) a base de biogás.

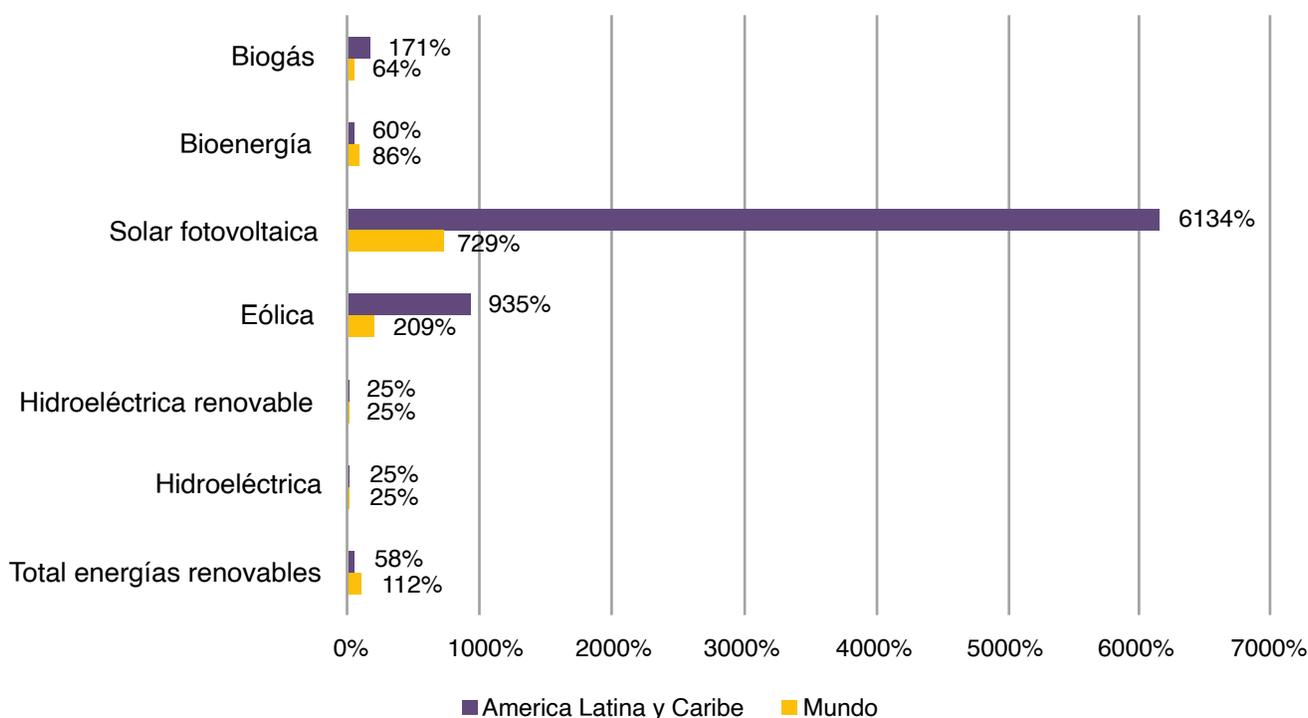
3.2.1 Energía solar fotovoltaica

La energía solar fotovoltaica es una de las fuentes renovables con mayor potencial de desarrollo para electrificar las zonas rurales. Debido a la flexibilidad en su aplicación, los sistemas solares fotovoltaicos representan una oportunidad única para que el sector energético proporcione “paquetes” de servicios a las zonas rurales aisladas, p. ej., para los servicios de salud, educación, comunicaciones y luz eléctrica, así como para la agricultura y el suministro de agua.

La energía solar fotovoltaica transforma de manera directa la luz solar en electricidad, empleando una tecnología basada en el efecto fotovoltaico, cuyo costo se está reduciendo drásticamente, debido a lo cual ya resulta plenamente competitiva en un número creciente de emplazamientos. Según datos de la IRENA (2021), los nuevos proyectos solares tienen un costo promedio de generación eléctrica (costo nivelado de la energía [LCOE]) similar o inferior al de las fuentes fósiles históricamente más baratas. En el caso de la energía solar, el LCOE promedio ponderado global se redujo en 85 % entre 2010 y 2020.

Esta fuente de energía renovable es la que presentó un mayor crecimiento entre 2012 y 2021 en todo el mundo y la región, donde, como se puede observar en la ilustración 14, mostró un crecimiento exponencial.

ILUSTRACIÓN 14. CRECIMIENTO DE LA CAPACIDAD INSTALADA DE ENERGÍAS RENOVABLES EN TODO EL MUNDO Y EN ALC (2012-2021).



Fuente: Elaborado con base en IRENA 2022.

En muchas regiones la tecnología solar fotovoltaica es la más adecuada para la electrificación rural y en todo el globo es la más utilizada para la aplicación de generación distribuida, debido a su abundancia, versatilidad en su incorporación, facilidad de montaje, bajo o nulo costo de mantenimiento y escalabilidad, tratándose de una tecnología modular ampliable sin dificultad en etapas sucesivas. Además, su instalación y puesta en marcha son muy rápidas, en comparación con el resto de las tecnologías de generación eléctrica.

Las instalaciones solares fotovoltaicas pueden ser utilizadas para abastecer hogares rurales, servicios sociales y comunales y en aplicaciones productivas agrícolas y no agrícolas. En el capítulo 4 se profundizará sobre sus usos en el medio rural.

3.2.2 Energía eólica

Tal como se observa en la figura 14, la energía eólica ha sido la segunda fuente de energía renovable que más ha crecido en capacidad instalada en ALC durante el período 2012-2021; sin embargo, este crecimiento se debe particularmente a la conexión de parques eólicos a redes eléctricas con gran capacidad de potencia instalada.

Los aerogeneradores convierten la energía cinética del viento en energía mecánica, que se transforma en energía eléctrica por medio de un rotor. Entre los principales componentes de una turbina de viento se incluyen un rotor, un generador/alternador (e inversor), una torre y una cola (para mantener la turbina apuntando hacia el viento).

La gran mayoría de las turbinas eólicas pequeñas (SWT) (<50 kW de generación nominal según la norma IEC 61400-2) empleables en la electrificación rural presenta una configuración de eje horizontal de tres palas. Una característica de diseño crítico de las turbinas eólicas es el control de la sobrevelocidad, dirigido a mantener el equipo dentro de un rango de operación seguro. Las SWT utilizan sistemas mecánicos y eléctricos de seguridad, una vez que sobrepasan un valor determinado de revoluciones por minuto.

Las turbinas eólicas son un complemento ideal de los paneles solares fotovoltaicos, ya que en un ciclo diario normal se produce más energía eléctrica solar durante el día y más electricidad eólica durante la noche. Adicionalmente, estas fuentes de energía se complementan a lo largo de las estaciones del año, dado que, mediante la energía eólica, se genera más electricidad en los meses durante los cuales los días son más cortos, mientras que, en los meses cuyos días son más largos, la energía solar fotovoltaica es la que aporta la mayor cantidad de energía eléctrica.

Según datos de la IRENA, en 2012 había instaladas en todo el mundo 806 000 SWT (<250 kW) en minirredes o redes aisladas (Kempener et al. 2015).

3.2.3 A base de biogás

La biodigestión anaeróbica es un proceso que ocurre de forma natural y que desde finales del siglo XIX se comenzó a utilizar como tecnología de tratamiento de efluentes y de generación de energías térmica y eléctrica.

A la fecha en Europa ya se han puesto en operación 14 000 biodigestores de mayor sofisticación tecnológica para generar ambos tipos de energía. Entre sus características principales se incluyen la centralización del tratamiento de los residuos, así como el uso de sistemas para su tratamiento y homogenización antes de entrar en el biodigestor, de sistemas de calefacción para trabajar en rangos mesofílicos o termofílicos y de sistemas mecánicos de mezcla continua del sustrato. En ALC la instalación de este tipo de

biodigestores explica el crecimiento durante el período 2012-2021 de 171 % de la capacidad instalada de energía generada con biogás. Si bien la mayoría de estas instalaciones se encuentra conectada a la red eléctrica, generalmente está ubicada en puntas de líneas en zonas rurales, lo que permite mejorar la fiabilidad del sistema y reducir las pérdidas en líneas de baja y media tensión. Estas aumentan la potencia eléctrica disponible de las agroindustrias para que puedan llevar a cabo sus procesos productivos que, de otra forma, en determinadas zonas de la región, no podrían realizar con el suministro eléctrico de la red eléctrica nacional. Este tipo de plantas se caracteriza por disponer de una potencia eléctrica instalada de entre 500 kW y 5 MW.

Además, en el mundo rural la tecnología de la biodigestión anaeróbica se ha utilizado en el autoabastecimiento de poblaciones aisladas; p. ej., China cuenta con más de 20 millones de biodigestores instalados (Tatidil et al. 2009) y la India, con más de 8 millones (SENER 2012), los cuales son de pequeña escala, descentralizados y empleados normalmente en un contexto familiar. Los sustratos no se someten a un pretratamiento ni a calefacción activa y la agitación del biodigestor se realiza de forma discontinua. Estos sistemas, que permiten tratar pequeñas cantidades de residuos orgánicos, suelen sustituir el uso de la leña como principal fuente de combustible para cocinar y calefaccionar y suplir la ausencia de electricidad o reducir la potencia necesaria de los sistemas fotovoltaicos o las SWT con heladeras e iluminación a partir de biogás.

En ALC el número de biodigestores instalados es mínimo, comparado con los millones establecidos en la India o China en el plano familiar y en Europa en el ámbito industrial. En nuestra región esta tecnología muestra un gran potencial de crecimiento, debido a la gran cantidad de desechos agropecuarios sometidos a un tratamiento inadecuado; por lo tanto, constituye un adelanto potencial para desarrollar la bioeconomía de la región (Rodríguez et al. 2017).

4

Aplicaciones de las energías renovables en las zonas agrícolas



4. Aplicaciones de las energías renovables en las zonas agrícolas

Las energías renovables constituyen la opción más adecuada para la electrificación de las zonas rurales desconectadas de la red eléctrica, ya que su generación, en la que se aprovechan los recursos energéticos disponibles localmente, se puede llevar a cabo cerca de los puntos de consumo en varias dimensiones y con distintas configuraciones.

Mediante las minirredes se puede prestar servicio a múltiples usuarios en una zona rural, ya que su diseño se puede adaptar a fin de generar electricidad para una amplia gama de usos, entre ellos, domésticos, de alumbrado público, de bombeo de agua, de electrificación de establecimientos públicos (escuelas y hospitales rurales, entre otros) y productivos en general. El reto que conlleva su establecimiento es satisfacer diversas necesidades de forma fiable y sin conflicto entre los diferentes usuarios, teniendo en cuenta que un recurso limitado debe ser compartido entre ellos. En este contexto es importante promover la concientización de los usuarios sobre la gestión de la demanda y, particularmente, sobre la del consumo (es decir, fomentar el consumo durante la generación de excedentes), en favor de la independencia del usuario individual y la flexibilidad en términos de uso.

En las zonas rurales las energías renovables tienen tres mercados donde desarrollarse: 1) en el de remplazo de generadores diésel, usualmente transformando el sistema de diésel en uno híbrido; 2) el de electrificación de zonas aisladas sin acceso a la electricidad; y 3) en el de “isla” de las redes en funcionamiento o su ampliación.⁴

Si bien no existe un acuerdo universal para definir sistema aislado, autónomo o minirred, Kempener et al. (2015) proponen una categorización de este concepto, con base en las definiciones disponibles en fuentes internacionales (p. ej., la Comisión Electrotécnica Internacional [IEC]) y nacionales (como el Departamento de Energía de los Estados Unidos y el Departamento Federal de Energía). La categorización (véase la tabla 1) propone una descripción general de este sistema de fuentes renovables según sus aplicaciones, usuarios y componentes. Entre los sistemas stand-alone, que tienden a ser pequeños y sin conexión a una red, se incluyen los sistemas solares residenciales *off-grid* y de luminarias solares, así como las SWT, mientras que las pico, nano, micro y minirredes son en su mayoría semiautónomas, pueden operar en modo isla o estar conectadas a las redes de distribución locales. Por último, se encuentran las redes aisladas para fines productivos, como los de las torres de telecomunicaciones, las bombas de agua y el alumbrado público, entre otros.

⁴ El término “islas” se refiere a la condición en la que una parte de la red se aísla temporalmente de la red principal.

TABLA 1. PROPUESTA DE CATEGORIZACIÓN DE APLICACIONES OFF-GRID.⁵

	Stand-alone			Redes		
	CC		CA	CA/CC		CA
Sistema	Kits de iluminación solar	Sistemas residencial es solares	Sistemas residenciales solares y sistemas de CA simples	Nano y picorredes	Micro y minirredes	Full-red
Aplicación	Iluminación	Iluminación y artefactos Iluminación y artefactos		Iluminación, artefactos y energía de emergencia	Todos los usos	
Usuarios	Residenciales y comunitarios		Comunitario y comercial		Comunitario, comercial e industrial	
Componentes principales	Paneles, inversor, baterías, luminarias, cargador y celulares	Paneles, inversores, baterías y artefactos DC	Paneles, inversores, baterías, luminarias, artefactos AC y electrificación de edificios autónomos	Paneles, inversores, baterías y red de distribución monofásica	Paneles, inversores, baterías y red de distribución trifásica	Paneles, inversores, baterías y red de distribución trifásica y transmisión

Fuente: Elaborado con base en Kempener et al. 2015.

La tabla 1 permite diferenciar los sistemas *off-grid* según sus aplicaciones y componentes; no obstante, para comparar el alcance y la escala de cada proyecto, se puede utilizar la siguiente clasificación, propuesta también por Kempener et al. (2015):

1. Capacidad de generación

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático define a las minirredes como redes con una potencia de hasta 15 MW, mientras que la Alianza Global de Energía Comunitaria establece 3 MW como rango superior; sin embargo, estas capacidades son arbitrarias. Existen varias islas que operan redes con una capacidad mayor a 1 GW; p. ej., Nauru tiene una capacidad de 6 MW; Tonga, de 15 MW (IRENA 2013); y Chipre, de 1 GW. Por otra parte, Cuba y República Dominicana cuentan con una capacidad instalada de 5 GW. Además, en complejos industriales existen sistemas aislados que abastecen el proceso productivo, a menudo con una capacidad instalada de entre 5 a 100 MW, equivalente al consumo de una ciudad de 25 000 a 250 000 habitantes. Navigant (2014) define las nanorredes como redes cuya potencia instalada se halla entre los 5 kW y los 100 kW.

⁵ La IEC define como stand-alone a los sistemas de electrificación individual. La sigla CA corresponde a corriente alterna y CC, a corriente continua.

2. Datos del proyecto

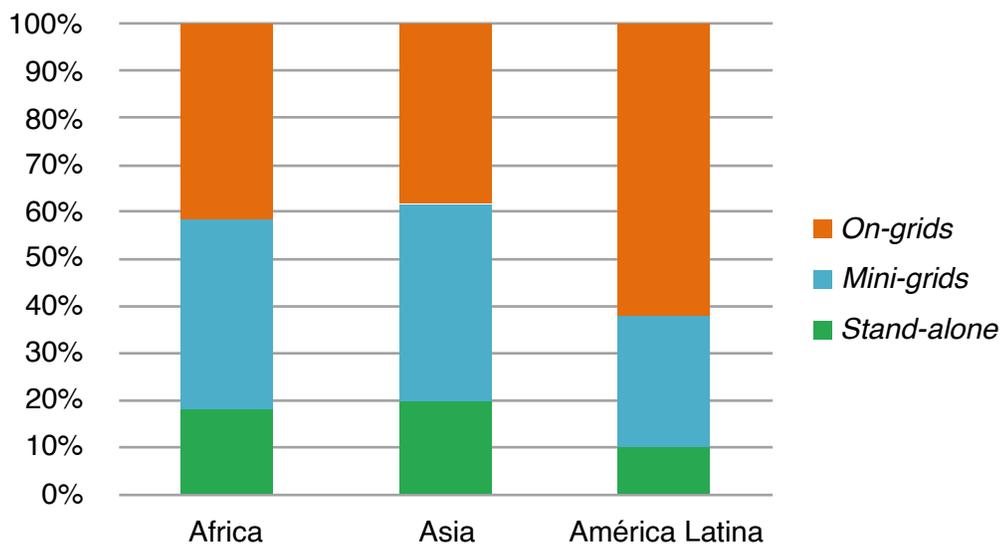
Los sistemas *off-grid* se clasifican con base en la información del proyecto. De acuerdo con Werner y Breyer (2012), las redes diseñadas para la electrificación de comunidades aisladas tienen una potencia promedio de 69.9 kW, lo cual es consistente con la información del Banco Mundial (2014b) sobre las minirredes en Sri Lanka (p. ej., 268 redes *off-grid* con una potencia promedio de entre 3 kW y 50 kW) o Camboya (una potencia promedio de 150 kW). Los sistemas híbridos de minirredes que combinan fuentes renovables con generadores diésel pueden llegar hasta los 100 MW de capacidad instalada, mientras que las minirredes de usuarios industriales generalmente tienen una capacidad del orden de varias decenas de MW (Breyer 2012, Berthau 2013).

3. Capacidad de la unidad generadora

- *Stand-alone*: de 0 a 0.1 kW
- *Pico-grid*: de 0 a 1 kW
- *Nano-grid*: de 0 a 5 kW
- *Micro-grid*: de 5 a 100 kW
- *Mini-grid*: de 0 a 100 000 kW

Para cumplir con el objetivo de dar acceso universal a la electricidad a toda la población en 2030, el 60 % de la generación adicional requerida debe provenir de instalaciones *off-grid* (IRENA 2012). Desde un punto de vista económico, las tecnologías de generación de energía a partir de fuentes renovables tienden a ser la mejor opción en términos de costo-beneficio para la electrificación rural *off-grid*. En la figura 15 se muestra el enfoque que se debe dar a la electrificación según la región para lograr el acceso universal en 2030.

ILUSTRACIÓN 15. ENFOQUE REQUERIDO PARA LOGRAR EL ACCESO UNIVERSAL A LA ELECTRICIDAD EN 2030 (COMO % DE LA GENERACIÓN).



Fuente: Elaborado con base en AIE 2010.

En muchos países la electrificación rural a través de fuentes de energía renovable ya es una realidad. A continuación, se describen algunos casos de éxito en la utilización de fuentes de energías renovables para suplir la necesidad de electrificación rural.

4.1 Biogás como opción para suplir la carencia de electrificación rural o complementar las puntas de línea disponibles.⁶

La biodigestión anaeróbica de la materia orgánica es una tecnología ampliamente probada en todo el mundo a diferentes escalas (residencial e industrial). En el presente trabajo se brindan ejemplos del uso de esta tecnología para suplir la falta de acceso a la energía eléctrica en el medio rural utilizando como vector energético el biogás. Además, se examinan casos de uso del biogás como complemento de la red eléctrica para reducir el uso de combustibles fósiles y mejorar las líneas de distribución en los puntos de consumo de energía eléctrica.

Cabe destacar que la tecnología de la biodigestión anaeróbica empleada en la producción de biogás contribuye a disminuir la contaminación del medio ambiente y las emisiones de GEI, a ahorrar combustibles fósiles y fertilizantes químicos y a mejorar la calidad de vida de los pobladores de las zonas rurales y suburbanas (Vidal 2013).

El biogás está compuesto principalmente por dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y, en menor medida, otros gases, entre los que se destaca el sulfuro de hidrógeno (H₂S), un gas altamente tóxico, causante del olor fuerte y desagradable que se percibe en los ambientes naturales donde se genera biogás por la degradación anaeróbica de la materia orgánica. En la tabla 2 se muestra la composición típica del biogás, en comparación con algunos combustibles fósiles.

TABLA 2. PODER CALORÍFICO DE DIFERENTES FUENTES FÓSILES DE ENERGÍA Y DEL BIOGÁS.

Fuente	Densidad kg/l	Poder calorífico inferior		Poder calorífico superior	
		kcal/l	kcal/kg	kcal/l	kcal/kg
Carbón mineral (Argentina)*	-	-	5900	-	6200
Fueloil	0.945	9261	9800	9923	10 500
Gas natural (Nm ³)	-	8300	-	9300	-
Propano	0.508	5588	11 000	6102	12 013
Butano	0.567	6180	10 900	6735	11 878
Gas licuado	0.537	-	10 950	6418	11 951
Biogás	-	5500	-	6111	-

Fuente: Fuente: Elaborado con base en MEyM 2017.

*Sobre base húmeda.

⁶ Para más información sobre el desarrollo del biogás en Latinoamérica, puede consultarse Torroba, Brenes Porras, Pino Donoso y Pedraza (2023)

El biogás se puede utilizar en la combustión directa (calefacción, cocción, refrigeración con gas e iluminación), así como en la sustitución de combustibles fósiles en motores de combustión interna para generar energía eléctrica y calor (equipos de cogeneración). De acuerdo con Carreras (2013), aunque en América Latina históricamente se ha utilizado en la cocción de alimentos y la calefacción, en los últimos años se ha incrementado su uso en la generación de energía eléctrica-térmica (IRENA 2017). La distribución del biogás en redes de gas natural o su empleo como biogás natural licuado es incipiente y, si bien en la literatura se reporta la inyección de biogás en redes de gas natural de Suecia, Luxemburgo y España, a partir de 2022 este sector está teniendo un importante impulso en Europa y América del Norte debido al aumento en el precio de los combustibles fósiles y a la necesidad de Europa de producir su propio gas (Jury et al. 2010, Forsberg 2014, Hernández et al. 2015).

4.2 Experiencia de suministro de biogás en una comunidad rural

López-Savran y Suárez-Hernández (2018) informaron sobre la instalación de una red de distribución, construida con tuberías de polietileno de alta densidad con una longitud total de 2150 m. Su objetivo era distribuir el biogás generado en un centro de producción porcina a 31 viviendas seleccionadas de una comunidad rural de El Colorado, en el municipio de Cabaiguán, provincia de Sancti Spíritus, Cuba, para su utilización en la cocción de alimentos, el calentamiento de agua, el alumbrado y la refrigeración, en sustitución de la leña o la energía eléctrica de la red. Entre sus beneficios se incluyeron la reducción de 11 t/año en el consumo de leña para la cocción en el comedor obrero de la unidad empresarial de base porcina (UEBP) El Colorado y en las viviendas, la humanización del trabajo y el bienestar de los trabajadores en el comedor obrero. En las viviendas se disminuyó el consumo de energía eléctrica entre 40 % y 60 % en promedio, mientras que se dejó de consumir 18.3 MW h/año de energía eléctrica del Sistema Electroenergético Nacional.

La UEBP contaba con dos biodigestores del tipo chino modificado de 45 m y 50 m de digestión cada uno, construidos dentro del proyecto internacional “La biomasa como fuente renovable de energía para el medio rural” y con los cuales se trataban las excretas de 600 cerdos. La producción diaria de biogás era de 90 m³ y el consumo diario de la instalación productiva, de entre 15 m³ y 17 m³, por lo que el excedente se distribuía en una comunidad rural ubicada en la inmediación, cuya vivienda más cercana se encontraba a 100 m y la más lejana, a 270 m.

A fin de garantizar la limpieza del biogás (la eliminación del H₂S) se empleaba un sistema de filtrado con limallas de hierro y agua. Los residuos generados por los filtros se recogían y se depositaban en la laguna aerobia de tratamiento de la UEBP.

Para calcular el ahorro de energía eléctrica de las viviendas se emplearon los datos brindados por la empresa eléctrica y se analizó el consumo histórico desde 2008 hasta 2015.

El consumo de biogás se llevó a cabo por medio de tres cocinas domésticas de dos quemadores, un fogón industrial de dos quemadores, una olla arrocera, cinco lámparas y un refrigerador para su uso en la UEBP, así como de una cocina doméstica de dos quemadores y una olla arrocera para su empleo en cada una de las 31 viviendas. Las mediciones realizadas durante la experiencia arrojaron los siguientes resultados de consumo promedio de biogás:

- Por vivienda: de 1.5 m³ a 1.7 m³/día
- En la UEBP: de 15 m³ a 17 m³/día
- En las 31 viviendas: de 60 m³/día
- Por persona: 0.5 m³/día

La instalación de la red de distribución de biogás redujo el consumo de energía eléctrica y mejoró la calidad de vida de las personas y el medio ambiente. Antes de usar el biogás, en la unidad productiva y en la comunidad las fuentes de energía más utilizadas para cocinar eran la electricidad, el diésel (a un alto costo) y la leña (de difícil acceso debido a su escasez). Además, el consumo de energía eléctrica en las 31 viviendas disminuyó entre 30 % y 60 % (López-Savran y Suárez-Hernández 2018).

Los datos obtenidos a partir de la investigación realizada con respecto al consumo de energía eléctrica son:

- Consumo promedio de electricidad antes de utilizar el biogás en las viviendas: 80.3 MWh/año
- Consumo promedio de electricidad después de emplear el biogás en las viviendas: 61 MWh/año
- Disminución del consumo de electricidad: 18.3 MWh/año

López-Savran y Suárez-Hernández (2018) concluyeron que la producción de biogás a partir de residuos agroindustriales de zonas rurales para su uso doméstico demostró su pertinencia y factibilidad, por lo que esta experiencia se convierte en una referencia para el fomento de la producción de agroenergía.

Producción de energía eléctrica a partir de los residuos orgánicos de un mercado cooperativo de frutas y hortalizas.

En 2021, en el marco del “Proyecto GEF ARG 16/G23: modelos de negocios sostenibles para la producción de biogás a partir de residuos sólidos urbanos orgánicos” se financió la provisión, instalación y puesta en funcionamiento de un biodigestor en el “Mercado Concentrador de Frutas y Verduras: Comunidad Boliviana”, en la localidad de Escobar, de la provincia de Buenos Aires, Argentina. Dicha iniciativa tenía los objetivos de:

- Valorizar los pasivos ambientales orgánicos del mercado;
- Generar energía eléctrica a partir de fuentes renovables para abastecer parte del consumo de energía del mercado; y
- Producir un biofertilizante apto para su uso agronómico (digerido).

Dichos objetivos se cumplieron. Hoy el mercado dispone de un biodigestor con capacidad para tratar hasta 5 t de residuos orgánicos/día y una capacidad instalada para generar hasta 5 kWh de energía eléctrica, con la que se ilumina la playa de camiones y el galpón de acopio. Actualmente el biodigestor trabaja con una carga diaria de 1 t/día y genera 80 m³ de biogás/día, una parte del cual se usa en el grupo electrógeno, mientras que la restante se quema en una antorcha, a la espera de ampliar la capacidad de generación.



4.2.1. Experiencia de inyección de energía a base de biogás en la red eléctrica.

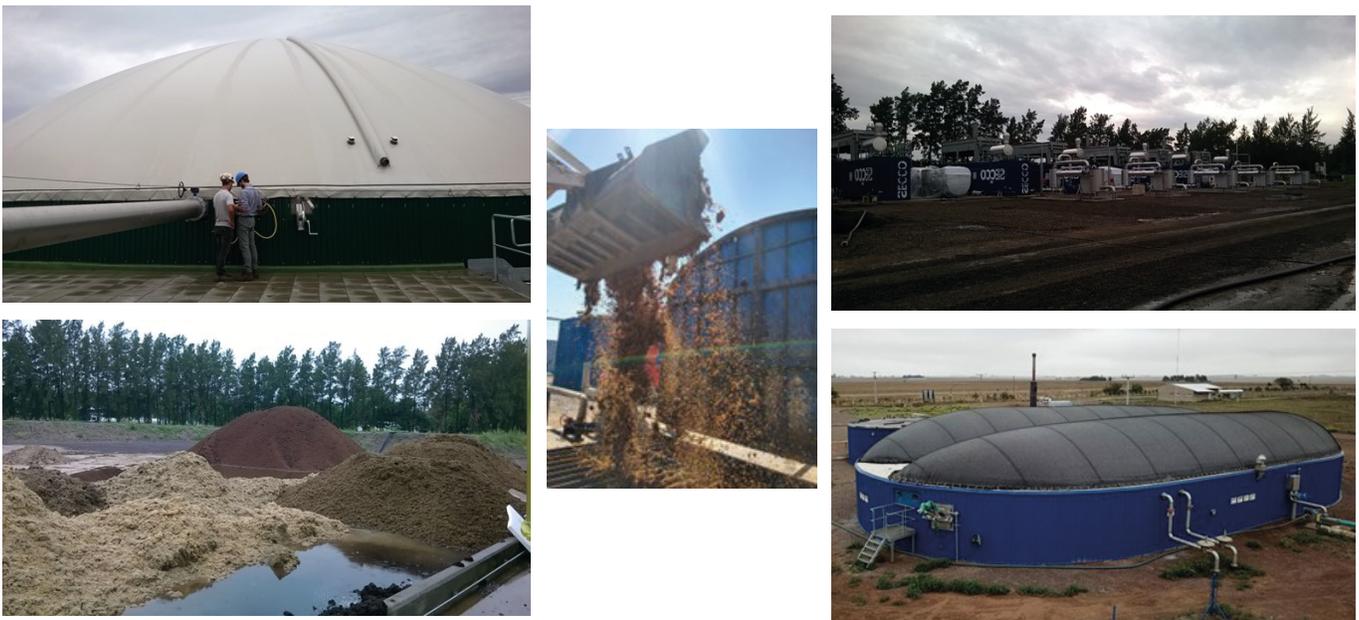
Como ya se mencionó, a partir de 2017 el uso del biogás a escala industrial empezó a tomar fuerza en la región. La tecnología más utilizada es la de biodigestión húmeda en reactores de mezcla completa, dentro de la cual se emplean residuos de la agroindustria y se realiza la inyección en puntas de línea (líneas de media tensión de 13.2 kV o 33 kV).

Esta tecnología de biodigestión anaeróbica se aplicó dentro del Programa de Abastecimiento de Energía Eléctrica a partir de Fuentes Renovables (RenovAr), implementado en Argentina a partir de 2016 y mediante el cual el Estado realizó licitaciones para firmar contratos de abastecimiento de energía eléctrica generada a partir de fuentes renovables entre entidades privadas y la Compañía Administradora del Mercado Mayorista Eléctrico S. A.

El RenovAr se diseñó para cumplir con las metas fijadas por la Ley Nacional n.º 27 191, donde se establece que en 2025 el 20 % de la matriz eléctrica del país deberá proceder de fuentes renovables.

Los proyectos de biogás que participaron en el RenovAr se ejecutaron en su mayoría en zonas rurales para revalorizar los pasivos agroindustriales y mejorar la fiabilidad y calidad del servicio de las redes de baja y media tensión. Está compuesto por reactores de mezcla completa, donde la materia orgánica se digiere anaeróbicamente para producir biogás, empleado en motores de combustión interna acondicionados para cogenerar energías eléctrica y térmica. La energía eléctrica se utiliza en el autoabastecimiento de la central y la inyección a la red, mientras que el calor del grupo electrógeno se aprovecha en la calefacción de los biodigestores y en usos agroindustriales de vapor o agua caliente, en sustitución de los gases natural y licuado y del combustible biomásico.

ILUSTRACIÓN 16. CENTRALES DE BIOGÁS UNIDAS AL SISTEMA INTERCONECTADO DE ARGENTINA.

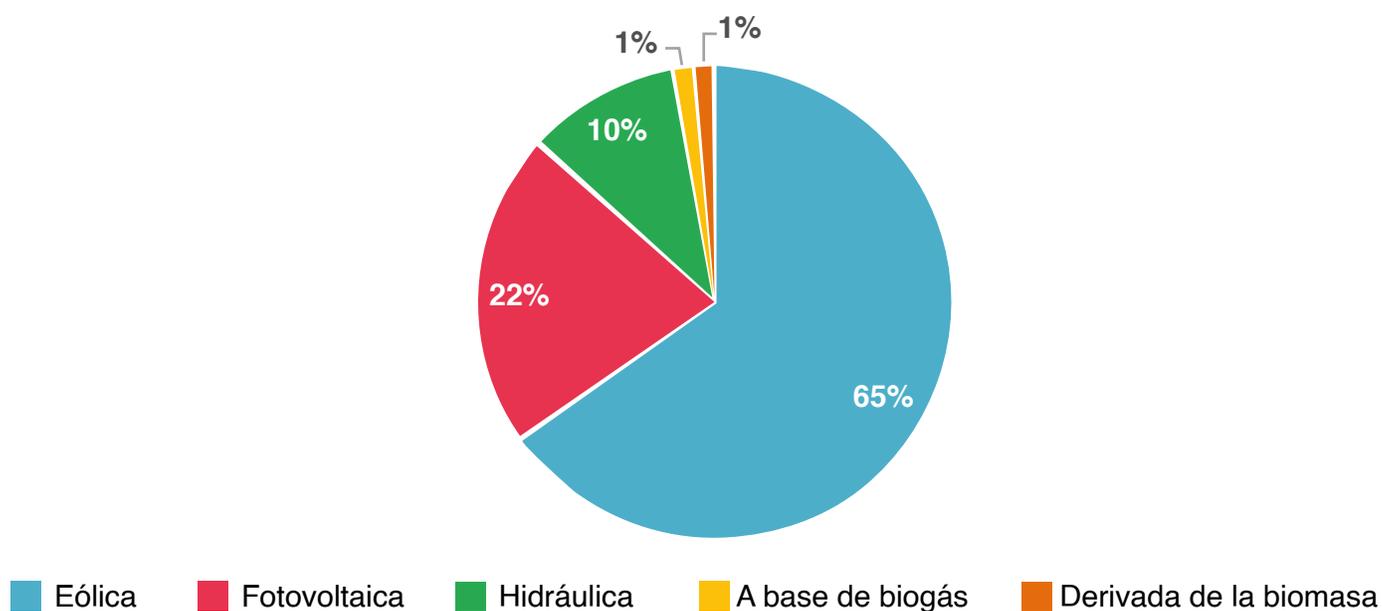


Fuente: Tomado de IFES S.R.L. (comunicación personal) y 3C BIOGÁS S. A.2022.

En la actualidad en el país operan 24 centrales de biogás con biodigestores de mezcla completa que utilizan residuos agroindustriales para generar energía eléctrica, así como cuatro centrales que emplean el biogás generado en el relleno sanitario de la Coordinación Ecológica Área Metropolitana Sociedad del Estado. En total, todas las centrales tienen una potencia instalada de 75 MW, lo que representa el 1.5 % de la potencia eléctrica instalada en centrales de fuentes renovables conectadas a la red (véase la ilustración 17).

ILUSTRACIÓN 17. POTENCIA ELÉCTRICA INSTALADA POR TECNOLOGÍA DE FUENTE RENOVABLE EN LA REPÚBLICA ARGENTINA.

Potencia instalada por tecnología República Argentina



Fuente: Elaborado con base en CAMMESA 2022.

4.3 Energía solar fotovoltaica para abastecer el consumo eléctrico en zonas rurales.

La energía solar fotovoltaica, utilizable *on-grid* u *off-grid* para abastecer diferentes tipos de consumo residencial, comunitario o industrial, es la principal tecnología empleada por los países de la región entre las fuentes de energía renovable disponibles para abastecer el consumo de electricidad en comunidades rurales aisladas.

4.3.1 Experiencia de suministro de energía eléctrica con sistemas fotovoltaicos en comunidades rurales aisladas de Perú.

El Ministerio de Energía y Minas de la República del Perú cuenta con el Plan Nacional de Electrificación Rural (PNER) para el período 2021-2023, cuya finalidad es pasar de 86 % de cobertura eléctrica rural en 2021 a 95 % en 2023.

El PNER utiliza diversas tecnologías para la electrificación rural. En primer término, se consideran las extensiones de redes del Sistema Eléctrico Interconectado Nacional y de los sistemas aislados, a partir de los cuales se desarrollan los sistemas eléctricos rurales.

La imposibilidad o la inconveniencia técnica o económica de conectarse a estos grandes sistemas eléctricos convierte al uso de fuentes de energía solar en la segunda alternativa tecnológica para satisfacer las necesidades de electrificación rural, a través de la implementación de sistemas fotovoltaicos de uso doméstico o comunitario en áreas geográficas con potencial solar, como las zonas de la Sierra y la Selva.

Como tercera alternativa tecnológica se considera la energía hidráulica, por medio de la construcción de centrales minihidroeléctricas, principalmente en las zonas ubicadas desde los Andes hasta las vertientes occidentales y orientales, donde existen recursos hidráulicos y caídas de agua. La energía eólica es la cuarta alternativa, cuya aplicación se viene evaluando para fines de electrificación rural en zonas de los valles intermedios y en las cercanías del litoral.

En diversas zonas rurales de Perú se han utilizado los sistemas fotovoltaicos para atender las necesidades básicas de energía eléctrica de viviendas, locales comunitarios e instituciones públicas.

La Dirección General de Electrificación Rural, encargada de la ejecución del PNER, utiliza de manera creciente los paneles solares como una alternativa de suministro de energía eléctrica a localidades rurales y/o comunidades nativas muy aisladas, a donde resulta imposible llegar con los sistemas convencionales para satisfacer las necesidades básicas de energía eléctrica de estas localidades, priorizando las zonas de frontera y la Amazonia.

Mediante la electrificación rural con sistemas fotovoltaicos se apoyó la provisión del servicio de forma sostenible y eficiente, asegurando la preparación, ejecución y operación de subproyectos de electrificación rural por parte de las compañías de distribución de electricidad entre sus operaciones comerciales regulares. Este modelo estimula la eficiencia y sostenibilidad al trabajar a través de las compañías de distribución eléctrica (Banco Mundial 2014a). Para ello, el Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería estableció una tarifa regulada para los servicios de electricidad abastecidos por los sistemas solares fotovoltaicos y garantizó que sus clientes fueran elegibles para el subsidio cruzado de electricidad en vigor.

Entre las actividades innovadoras del PNER relativas al uso de los sistemas solares fotovoltaicos se incluyen:

- Un enfoque más eficiente de la ampliación de la red para maximizar el uso de los recursos del proyecto y la movilización de financiamiento adicional por medio de la participación activa de las compañías de distribución.
- La promoción de los usos productivos de la electricidad en zonas rurales.
- La asistencia a las compañías de distribución para proporcionar los primeros servicios regulados independientes de la red mediante sistemas solares fotovoltaicos para usos domésticos.

Los resultados obtenidos hasta febrero de 2020 por el PNER con respecto a la electrificación rural con sistemas solares fotovoltaicos se muestran en la tabla 3.

TABLA 3. RESUMEN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS POR EL PNER, PERÚ (A FEBRERO DE 2020).

DEPARTAMENTO	VIVIENDAS	CENTROS EDUCATIVOS	PUESTOS DE SALUD	INSTALACIONES VERIFICADAS A FEBRERO DE 2020
AMAZONAS	10 944	170	25	11 139
ANCASH	4045	0	0	4045
APURIMAC	6577	22	18	6617
AREQUIPA	3998	29	18	3985
AYACUCHO	5643	0	0	5643
CAJAMARCA	6016	132	41	6189
CUSCO	18 443	108	28	18 579
HUANCAVELICA	3697	0	0	3697
HUANUCO	19 996	235	48	20 279
ICA	667	0	0	667
JUNÍN	17 587	111	8	17 706
LA LIBERTAD	5627	26	5	5658
LAMAYEQUE	1295	38	17	1350
LIMA	995	0	0	995
LORETO	22 478	767	152	23 397
MADRE DE DIOS	3821	81	47	3949
MOQUEGUA	1151	12	12	1175
PASCO	6201	88	32	6321
PIURA	2884	0	0	2884
PUNO	27 141	136	51	27 328
SAN MARTÍN	23 075	115	45	23 235
TACNA	477	29	4	510
TUMBES	4	0	0	4
UCAYAU	12 436	269	88	12 793
TOTAL	205 138	2368	639	208 145

Fuente: Elaborado con base en DGER 2020.

Los tres sistemas fotovoltaicos utilizados son los siguientes:

1. RER1

Equipo fotovoltaico doméstico de CC (12 V) con componentes internos y externos para su instalación en las viviendas seleccionadas y que incluye:

- Un panel solar de 120 Wp,
- Una caja de energía de CC (regulador de carga y batería),
- Un tablero de distribución con llaves termomagnéticas,
- Tres lámparas ledes (bombillas de 7 W),
- Un toma corriente para dispositivos eléctricos como radios y televisores de CC (12 V) y
- Un toma para recargar teléfonos móviles.

2. RER 2

Equipo fotovoltaico comunitario de CA (220 V), con componentes internos y externos para su instalación en estructuras sanitarias que no disponen de energía eléctrica. El sistema incluye:

- Dos paneles fotovoltaicos de 300 Wp cada uno,
- Un grupo de baterías (doce baterías en serie de 180 Ah),
- Un regulador de carga e inversor,
- Sistemas de seguridad (toma de tierra) y
- Un tablero de distribución (dos llaves termomagnéticas y una diferencial).

3. RER3

Equipo fotovoltaico comunitario de CA (220 V) con componentes internos y externos para su instalación en instituciones escolares que carecen de energía eléctrica. Incluye los siguientes elementos:

- Cuatro paneles fotovoltaicos de 300 Wp cada uno,
- Un grupo de baterías (doce baterías en serie de 360 Ah),
- Un regulador de carga e inversor,
- Sistemas de seguridad (toma de tierra) y
- Un tablero de distribución (dos llaves termomagnéticas y una diferencial).

ILUSTRACIÓN 18. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS AISLADOS ESTABLECIDOS EN VARIAS COMUNIDADES RURALES DE PERÚ.



Fuente: Tomado de Tozzi Green 2022.

La experiencia ha demostrado que la electrificación de comunidades aisladas rurales con equipos fotovoltaicos beneficia a su población, ya que favorece su desarrollo.

4.3.2 Minirredes de sistemas fotovoltaicos para abastecer de electricidad a localidades rurales en la Argentina

Dentro del Proyecto de Energías Renovables en Mercados Rurales (PERMER), ejecutado por la Secretaría de Energía del Ministerio de Infraestructura, Servicios Públicos, Tierra y Vivienda (MISTPyV) de Argentina, se desarrollan diversas iniciativas para proveer de energía a la población rural del país y mejorar su calidad de vida. Entre las áreas de intervención se destacan las minirredes, que son instalaciones de centrales fotovoltaicas con almacenamiento dirigidas a suministrar energía eléctrica a comunidades rurales aglomeradas para sus viviendas, instituciones de servicios públicos y pequeños emprendimientos productivos. Además, se llevan a cabo iniciativas provinciales como la de Jujuy que, a través de dicha secretaría, ejecuta el Plan Maestro Plurianual de Desarrollo para abastecer de energía eléctrica derivada de sistemas fotovoltaicos a ocho comunidades rurales.

Los proyectos de minirredes ya ejecutados o en ejecución liderados por el PERMER son:

1. Rodeo Colorado, en el departamento de Iruya, Salta

Potencia pico del generador fotovoltaico: 330 kWp, energía total del banco de baterías: 1100 kWh, potencia pico demandada (nominal): 180 kVA, potencia pico demandada (30 min): 220 kVA

2. Valle de Luracatado, en la provincia de Salta

Potencia pico del generador fotovoltaico: 1239 kWp, energía total del banco de baterías: 4800 kWh, potencia pico demandada (nominal): 565 kVA

3. Paloma Yaco, Catamarca

Potencia pico del generador fotovoltaico: 70 kWp, energía total del banco de baterías: 400 kWh, potencia pico demandada (nominal): 36 kVA, potencia pico demandada (30 min): 40 kVA

4. Alto Chorrillos, Salta

Potencia pico del generador fotovoltaico: 595 kWp, energía total del banco de baterías: 70 000 Ah, potencia pico demandada (30 min): 200 kVA

5. Catua, Jujuy

Potencia pico del generador fotovoltaico: 310 kWp, energía total del banco de baterías: 810 kWh, potencia pico demandada (nominal): 85 kVA, potencia pico demandada (30 min): 100 kVA

6. El Peñón, Jujuy

Potencia pico del generador fotovoltaico: 250 kWp, energía total del banco de baterías: 700 kWh, potencia pico demandada (nominal): 85 kVA, potencia pico demandada (30 min): 100 kVA

7. El Toro, Jujuy

Potencia pico del generador fotovoltaico: 250 kWp, energía total del banco de baterías: 750 kWh, potencia pico demandada (nominal): 85 kVA, potencia pico demandada (30 min): 100 kVA

8. Naupa Huen, Jujuy

Potencia pico del generador fotovoltaico: 140 kWp, potencia nominal del generador eólico: 60 kW, energía total del banco de baterías: 560 kWh, potencia pico demandada (nominal): 65 kVA, potencia pico demandada (30 min): 80 kVA

9. San Juan de Quillaques, Jujuy

Potencia pico del generador fotovoltaico: 120 kWp, energía total del banco de baterías: 344 kWh, potencia pico demandada (nominal): 38 kVA, potencia pico demandada (30 min): 46 kVA

Los proyectos desarrollados por el MISTPyV en la provincia de Jujuy con financiamiento propio son:

1. Olaroz Chico, Jujuy

Potencia pico del generador fotovoltaico: 134 kWp

2. La Ciénaga, Jujuy

Potencia pico del generador fotovoltaico: 30 kWp

3. El Angosto, Jujuy

Potencia pico del generador fotovoltaico: 22 kWp

4. Santa Ana, Jujuy

Potencia pico del generador fotovoltaico: 167 kWp

5. Caspalá, Jujuy

Potencia pico del generador fotovoltaico: 84 kWp

6. Lipán de Moreno, Jujuy

Potencia pico del generador fotovoltaico: 32 kWp, energía total del banco de baterías: 81 kWh

Todos estos proyectos tienen como objetivo abastecer el consumo eléctrico de las comunidades con energía solar fotovoltaica las 24 horas, los 365 días del año. Aparte de la red de distribución, los componentes básicos del sistema incluyen:

- Inversores híbridos⁷,
- Reguladores de carga MPPT,
- Paneles solares,
- Un sistema de monitoreo en línea y
- Bancos de baterías de iones de litio.

Los cálculos de dimensionamiento de estas centrales se realizaron con base en los perfiles de carga de insolación, considerando:

- Una participación solar cercana al 100 % a lo largo del año en función de condiciones de demanda máxima diaria estimada e insolación diaria media;
- Una profundidad de descarga diaria de 80 %;
- Una confiabilidad anual para asegurar la provisión de energía 24 h/día, 7 días/semana los 12 meses/año; y
- Una confiabilidad anual mínima requerida de 97 %.

⁷ Los inversores híbridos, que se utilizan en instalaciones fotovoltaicas de autoconsumo, tienen como función principal transformar la CC en CA, así como almacenar y descargar la energía obtenida de sus placas solares en las baterías.

ILUSTRACIÓN 19. MINIRREDES FOTOVOLTAICAS PARA EL ABASTECIMIENTO DE COMUNIDADES RURALES DE JUJUY, ARGENTINA.



Fuente: Arensol Ingeniería 2022 y EJSED S. A. 2022.

4.3.3 Energía eólica para abastecer el consumo eléctrico en zonas rurales.

La electrificación de comunidades aisladas por medio de energía eólica es una de las opciones tecnológicas utilizadas en la región. En su mayoría estos proyectos se han diseñado bajo el concepto de instalaciones individuales en cada punto de consumo.

Un ejemplo de abastecimiento de energía eléctrica con sistemas aislados de aerogeneradores es el de la comunidad de El Alumbre, en la sierra norte del Perú (Chiroque 2008, Chiroque et al. 2009). La solución implementada se basó en la instalación de equipos individuales por punto de consumo. En total se instalaron dos aerogeneradores de 500 W en la escuela y el centro de salud y 33 aerogeneradores de 100 W en domicilios particulares. En términos generales, la instalación en los domicilios cubre entre tres y cinco horas diarias de iluminación y de uso de pequeños electrodomésticos (p. ej., radios y equipos de sonido).

Estos sistemas de generación eólica autónomos pueden ser optimizados utilizando minirredes con almacenamiento de energía. La implementación de minirredes frente a la generación individual reduce los costos de inversión inicial y permiten cubrir escenarios de demanda más alta con un incremento menor de inversión (Ferrer-Martí *et al.* 2009).

ILUSTRACIÓN 20. VISTA GENERAL DE LA COMUNIDAD Y DE LOS AEROGENERADORES INSTALADOS EN EL ALUMBRE, PERÚ.



Fuente: Tomado de Ferrer-Martí et al. 2009.

En el abastecimiento de minirredes los generadores eólicos son un excelente complemento de los sistemas fotovoltaicos, ya que las plantas híbridas solares y eólicas requieren una menor capacidad de almacenamiento. El PERMER de Argentina está implementando este tipo de minirredes híbridas para la electrificación de comunidades rurales aisladas como Naupa Huen, en la provincia de Río Negro. La central híbrida permite reemplazar un suministro eléctrico limitado a base de gas licuado del petróleo por un servicio constante y de calidad derivado de energías renovable, solar y eólica, con acumulación de baterías de litio de nueva generación.

Para obtener más información sobre las instalaciones de energías renovables en zonas agrícolas, consúltese el anexo 2 del documento intitulado *Consideraciones básicas para un estudio de prefactibilidad y diseño de instalaciones de energías renovables en áreas rurales*.

5

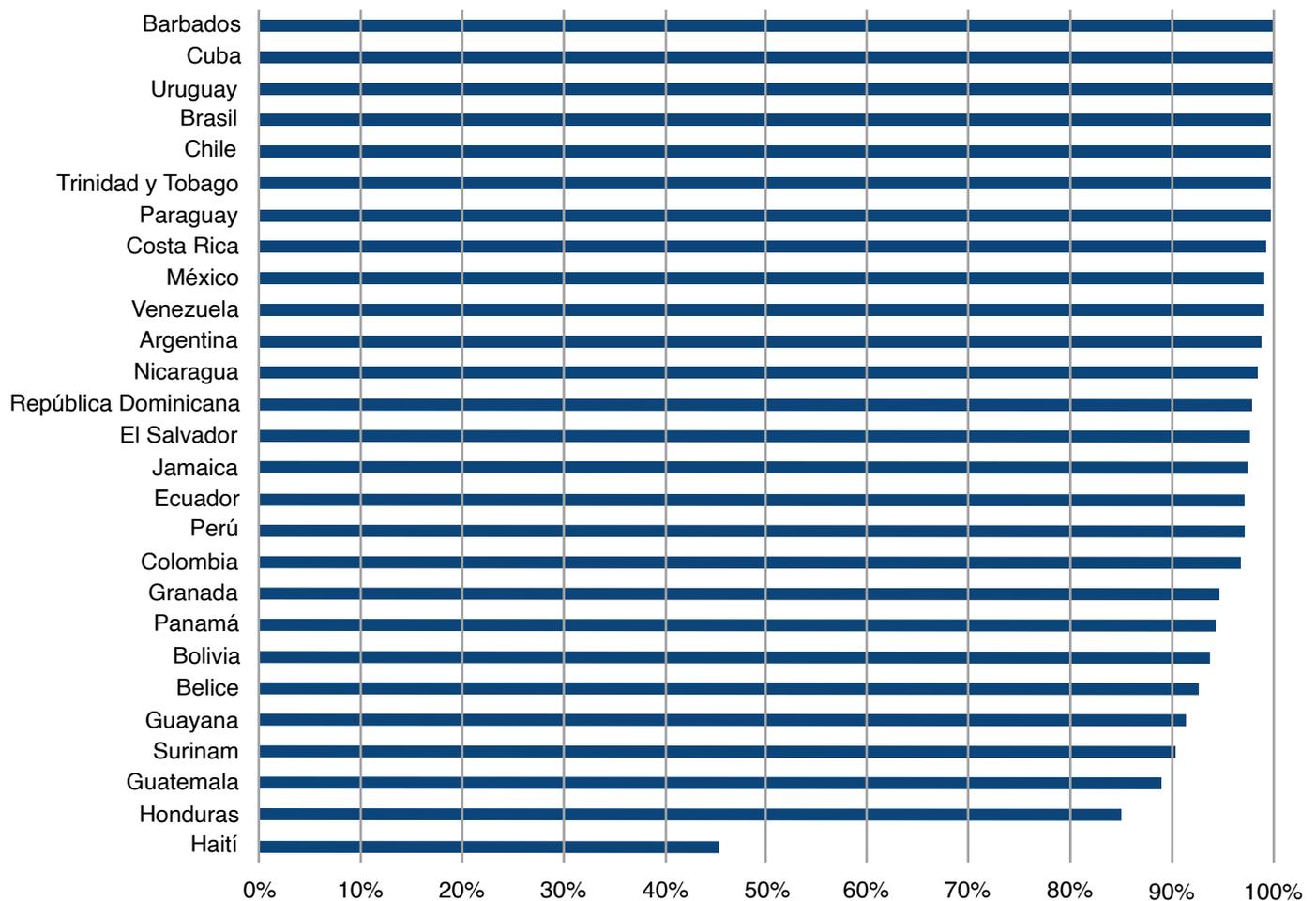
Potencial en los países de las Américas



5. Potencial en los países de las Américas

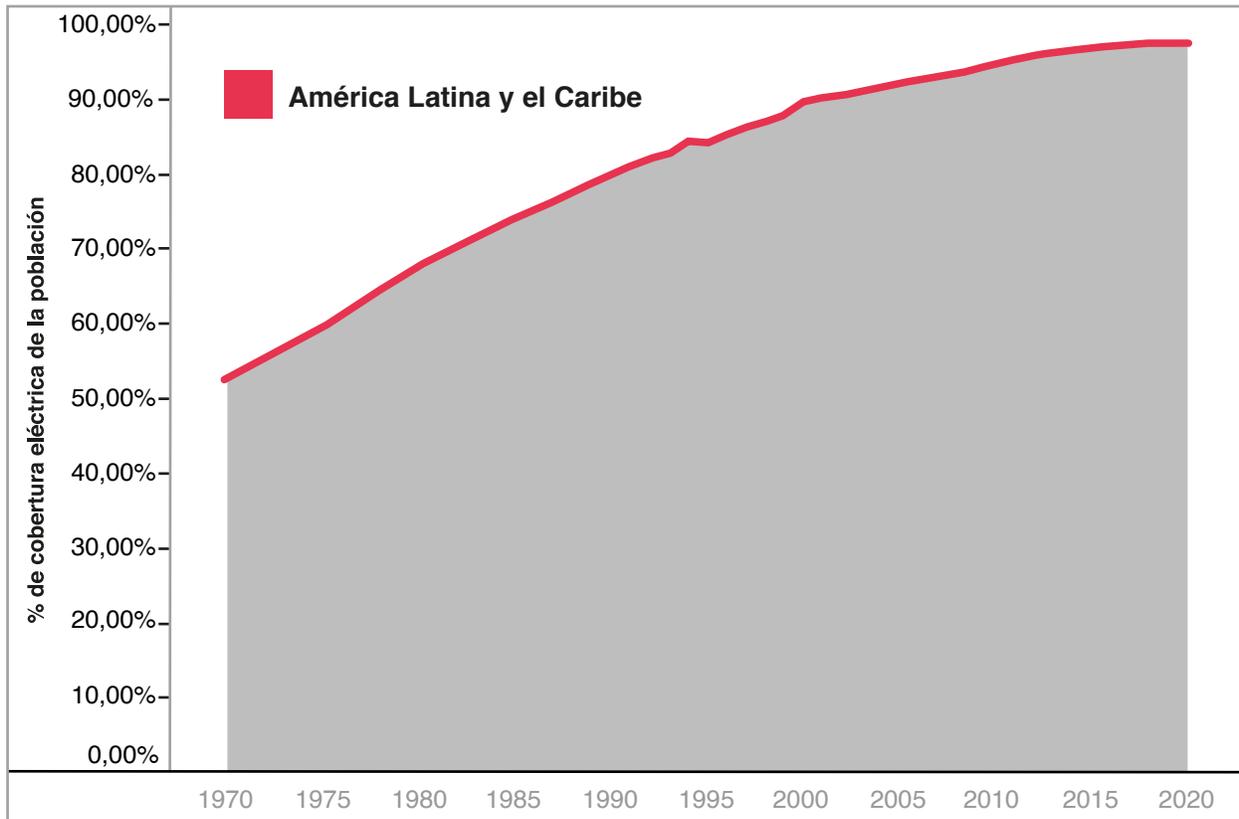
En las últimas cinco décadas los países de ALC han logrado aumentar en 46.7 % la población con acceso a electricidad. Según la CEPAL (2020) y el Hub de Energía (2022), en 2020 el índice de cobertura eléctrica en dicha región se ubicó entre 95.2 % y 97.38 %. Entre los países con un índice de cobertura eléctrica menor a 90 % se encuentran Guatemala, Honduras y Haití; en un escalón superior se hallan Surinam, Guyana, Belice, Bolivia, Panamá y Granada, que no superan el 95 % de índice de cobertura; mientras que el resto de los países se encuentra por encima del umbral. En la ilustración 21 se observa el índice de cobertura eléctrica correspondiente a cada país y en la ilustración 22, su evolución a lo largo de las últimas cinco décadas.

ILUSTRACIÓN 21. ÍNDICE DE COBERTURA ELÉCTRICA (%) EN LOS PAÍSES DE ALC (2020).



Fuente: Elaborado con base en Hub de Energía 2022.

ILUSTRACIÓN 22. EVOLUCIÓN EN LAS ÚLTIMAS CINCO DÉCADAS DEL ÍNDICE DE COBERTURA ELÉCTRICA DE LA POBLACIÓN DE LOS PAÍSES DE ALC (2020).



Fuente: Tomado de Hub de Energía 2022.

En ALC, entre las viviendas que no tienen acceso a la electricidad, el 90.1 % se encuentra en zonas rurales y solo el 9.9 %, en zonas urbanas (Hub de Energía 2022). Es aquí donde el rol de las energías renovables cobra importancia para llegar al 100 % de cobertura de la población en la región, así como para disponer de una matriz eléctrica descarbonizada.

En los últimos años el costo de las energías renovables ha bajado significativamente, lo que las convierte en una alternativa competitiva a los combustibles fósiles (IRENA 2021). En un estudio del Banco Interamericano de Desarrollo (BID) [2013] ya se sostenía que los costos decrecientes y los avances tecnológicos relativos a las instalaciones de generación de energía eléctrica renovable transformarían a los recursos renovables en una alternativa viable en la región para cubrir los requerimientos eléctricos y reducir la dependencia de los combustibles fósiles.

Se estima que los recursos solares, geotérmicos, mareomotrices, eólicos y de biomasa disponibles en ALC podrían producir hasta 80 PWh de electricidad (Vergara et al. 2013). En 2013 la región generaba 1.3 PWh y, en 2050, según el BID, la demanda regional crecerá entre 2.5 a 3.5 PWh, lo que significa que ALC tendría un potencial eléctrico renovable 22 veces mayor que la demanda esperada en 2050.

ILUSTRACIÓN 23. DISPONIBILIDAD DE RECURSOS RENOVABLES EN ALC.



Fuente: Tomado de BID 2013.

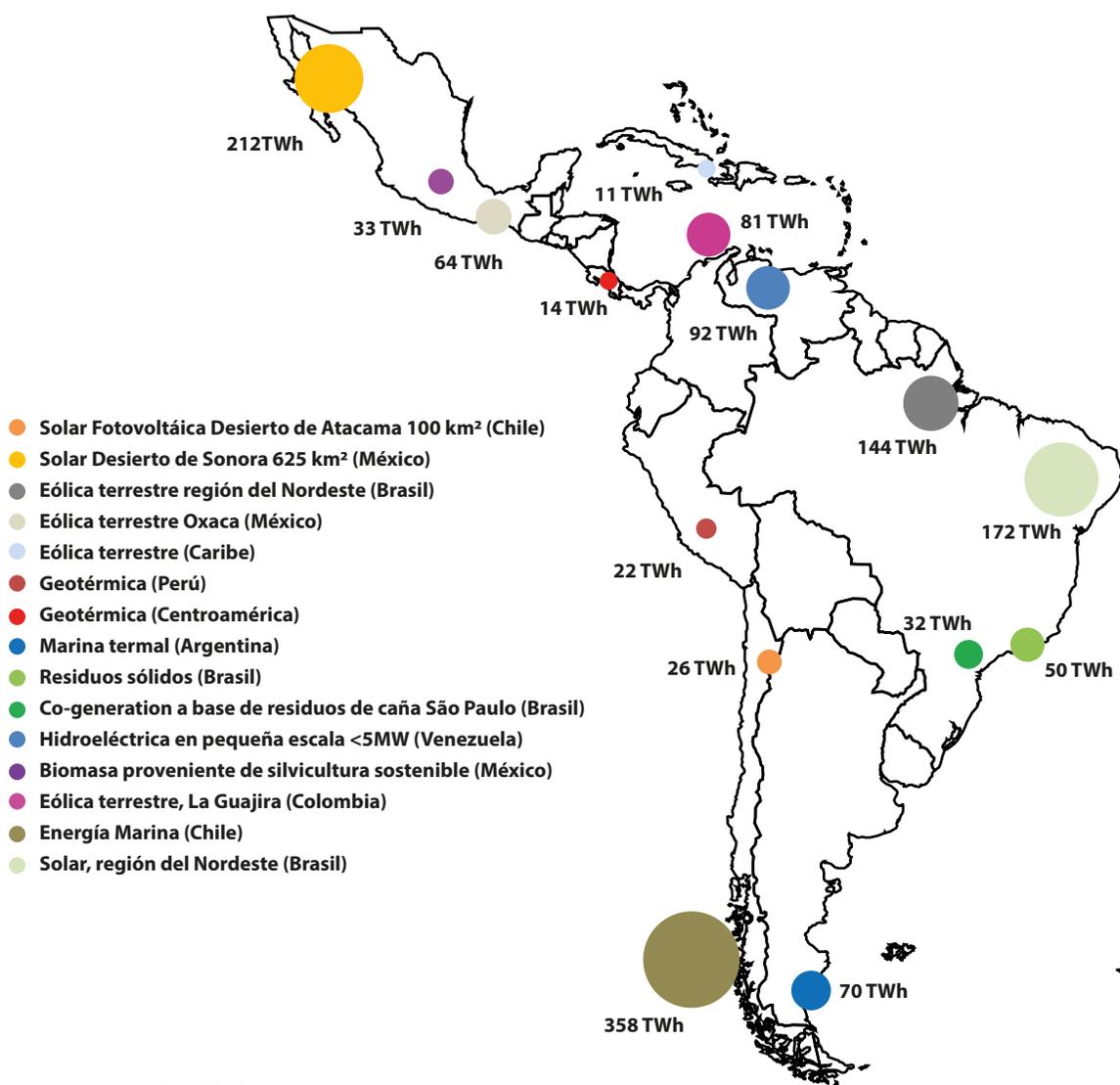
Las energías renovables, que constituyen recursos energéticos propios y sin fecha de vencimiento, brindan beneficios sociales en materia de seguridad energética, resiliencia climática, mejoras ambientales locales, creación de empleos domésticos y reducción en los gastos por combustibles fósiles, entre otros. Según Contreras *et al.* (2008), el valor de estos beneficios sociales (la evitación de emisiones de GEI y contaminantes *in situ*, de los costos de capacidad de generación, infraestructura adicional de transmisión, distribución y combustibles fósiles y de pérdidas de generación y del sistema, así como la prestación de servicios complementarios a la red y la prima de riesgo por cobertura de precios de los combustibles fósiles) podría ascender a USD 50 por cada MWh suministrado, lo que ubica a varias de estas alternativas en posiciones altamente competitivas. Al restar el valor de los beneficios sociales al LCOE, las tecnologías renovables resultan más baratas que las de combustibles fósiles.

Una de las características distintivas de la matriz eléctrica de ALC es la predominancia de las energías renovables, que constituyen el 59.56 % de la capacidad instalada en 2021 (IRENA 2022). El 70 % de la capacidad instalada renovable está cubierto con instalaciones hidroeléctricas, lo que aumenta la exposición de la región a los cambios en la estabilidad de los ciclos hidrológicos previstos según los escenarios actuales de cambio climático. En este contexto, con el fin de mantener una matriz diversificada de suministro eléctrico y limitar las emisiones de carbono, la región debe acceder a otros recursos de energía renovable.

La región dispone de abundantes recursos renovables distintos de la energía hidroeléctrica. Como se muestra en la ilustración 23, ALC podría producir alrededor de 80 PWh a partir de fuentes renovables. De acuerdo con el BID (2013), la capacidad pico nominal correspondiente sería de unos 34 TW (500 GW de energía geotérmica, 3400 GW de energía marina y oceánica, 450 GW de energía eólica en alta mar, 4200 GW de energía eólica en tierra firme, 17 000 GW de energía fotovoltaica, 7500 GW de energía solar concentrada y 850 GW de energía derivada de residuos de biomasa), lo que está muy por encima de la demanda esperada y es suficiente para satisfacer varias veces la demanda de toda la región e incluso la del mundo.

En la ilustración 24 se muestran los recursos regionales específicos de energía renovable, de conformidad con diversos estudios nacionales. Estas cifras no necesariamente representan todo el recurso en una zona dada. Constituyen un ejemplo del potencial de la región en toda su extensión territorial y marítima.

ILUSTRACIÓN 24. EJEMPLOS DE SITIOS RICOS EN RECURSOS DE ENERGÍA RENOVABLE PARA LA GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD EN ALC.



Fuente: Tomado de BID 2013.

En la región las energías renovables tienen el potencial de descarbonizar la matriz eléctrica, sustituyendo las centrales termoeléctricas con parques eólicos y/o solares fotovoltaicos o centrales geotérmicas, de biomasa, de biogás e hidro y minihidroeléctricas, así como de lograr la generación distribuida y la autogeneración en zonas rurales aisladas con sistemas de SWT, fotovoltaicos, minihidroeléctricos o de biogás donde no hay suministro eléctrico o donde este depende de motores de diésel o gasolina, tal como se describió en el capítulo III.

El vínculo entre las energías renovables y las zonas rurales existe no solo en términos de proyectos de centrales de potencias mayores a 0.5 MW conectadas a las redes eléctricas nacionales, sino también en cuanto a proyectos de pequeña escala. Los diferentes tipos de tecnologías por aplicar en las zonas rurales dependen de las fuentes de energía renovable por utilizar. A continuación se presentan algunos ejemplos de dichas fuentes de energía:

1. Eólica

- a. Parques eólicos que generan ingresos complementarios a los de las actividades agropecuarias tradicionales mediante el arrendamiento de terrenos agropecuarios para la instalación de los aerogeneradores y
- b. Sistemas de SWT para electrificar zonas rurales aisladas.

2. Solar fotovoltaica

- a. Parques fotovoltaicos que requieren un espacio abierto de tierras tradicionalmente utilizadas en la agricultura donde se pueden llevar a cabo actividades alternativas complementarias a las agrícolas.
 - i. En sistemas con estructuras tradicionales al ras del piso, pastoreo de ovejas como alternativa al corte de pasto mecánico tradicional, que evita la generación de polvo y que proporciona sombra, protección y refugio a las ovejas preñadas y
 - ii. Sistemas agrovoltáicos en los que se combina la generación de energía fotovoltaica con tierras de cultivo, pastos o hábitats de polinizadores. Los paneles solares no se instalan a ras de suelo, sino en alto (como celadores) para permitir el tránsito de animales y personas. Según Fernández et al. (2022), con estos sistemas las plantas pueden completar su proceso de fotosíntesis sin ningún problema.
- b. Sistemas fotovoltaicos de generación distribuida o minirredes en zonas rurales aisladas.

3. A partir de biodigestores

- a. Centrales de biogás (>0.5 MW) donde se emplean residuos agroindustriales o cultivos energéticos para producir biogás, a partir del cual se genera energía eléctrica en grupos electrógenos para inyectarla a la red eléctrica. En ellas se valorizan los pasivos ambientales o se agrega valor a los cultivos en su origen y se produce un fertilizante orgánico (digerido) con excelentes propiedades agronómicas.
- b. Biodigestores de pequeña escala para electrificar o suplir la ausencia de electricidad con biogás (p. ej., frigoríficos e iluminación con biogás).

4. Derivada de la biomasa

- a. Centrales de potencia >2 MW que utilizan residuos agropecuarios o de la industria forestal ricos en lignina como combustibles en calderas para producir vapor y, a través de turbogrupos, generar energía eléctrica para inyectarla a la red.

La región dispone de abundantes recursos renovables distintos de la energía hidroeléctrica. Como se muestra en la ilustración 23, ALC podría producir alrededor de 80 PWh a partir de fuentes renovables. De acuerdo con el BID (2013), la capacidad pico nominal correspondiente sería de unos 34 TW (500 GW de energía geotérmica, 3400 GW de energía marina y oceánica, 450 GW de energía eólica en alta mar, 4200 GW de energía eólica en tierra firme, 17 000 GW de energía fotovoltaica, 7500 GW de energía solar concentrada y 850 GW de energía derivada de residuos de biomasa), lo que está muy por encima de la demanda esperada y es suficiente para satisfacer varias veces la demanda de toda la región e incluso la del mundo.

En la ilustración 24 se muestran los recursos regionales específicos de energía renovable, de conformidad con diversos estudios nacionales. Estas cifras no necesariamente representan todo el recurso en una zona dada. Constituyen un ejemplo del potencial de la región en toda su extensión territorial y marítima.

ILUSTRACIÓN 25. PASTOREO DE OVEJAS EN PARQUES FOTOVOLTAICOS.



Fuente: Tomado de García y Martín-Peñasco 2018.

Como ya se mencionó, en la región las energías renovables resultan fundamentales para lograr la electrificación del 100 % de las zonas rurales y garantizar la descarbonización de la matriz eléctrica. Para ello será necesario formular políticas públicas dirigidas a desarrollar todo el potencial de estas tecnologías en los países de ALC. En el siguiente capítulo se brindarán algunas recomendaciones clave al respecto para los tomadores de decisiones y formuladores de políticas.

6

Recomendaciones clave para los tomadores de decisiones



6. Recomendaciones clave para los tomadores de decisiones

La electrificación rural constituye una importante oportunidad para el desarrollo de las energías renovables en ALC. La lejanía de las redes centralizadas hace que esta sea la más cara de implementar y, por lo tanto, que esté abierta a alternativas como las que ofrecen las energías renovables. Es precisamente en el contexto rural donde se encuentran normalmente recursos como la radiación solar, las caídas o corrientes de agua, los vientos y la biomasa.

En las décadas pasadas entidades de ayuda internacional conceptualizaron los procesos de electrificación rural con energías renovables como asistencialismo o intento de creación de una barrera a las migraciones internas o externas. Luego, el concepto de asistencialismo fue remplazado por el de sostenibilidad, que, en los procesos de electrificación rural se dejó en manos de las fuerzas del mercado, al menos en el caso de proyectos financiados por organismos multilaterales de crédito; no obstante, en el contexto socioeconómico de la región, ninguno de estos modelos se pudo implementar con éxito, con independencia de la voluntad circunstancial de uno o varios actores (Fuente y Álvarez 2004).

Los nuevos paradigmas en torno a la electrificación rural están teniendo un impacto en las perspectivas de los responsables de abastecer de electricidad a estas comunidades, debido a lo cual los gobiernos locales deben participar desde el inicio en la estrategia prevista y encargarse de dar seguimiento a las acciones emprendidas.

Entre dichos paradigmas el más importante es el que da prioridad a las posibilidades productivas de una comunidad, más allá del mero acto de llevar luz a los hogares rurales. Otro paradigma plantea que la electrificación rural es la extensión de una red de suministro de bienes y servicios, más que la de una red eléctrica. Por lo tanto, junto con la necesidad de detener los flujos migratorios a las ciudades, las estrategias para llevar electricidad a zonas no electrificadas evolucionan aceleradamente. El concepto de sostenibilidad debe guardar una estrecha relación con el desarrollo socioeconómico local. Por otra parte, la electrificación rural debe ser un vector para el desarrollo social y, en este sentido, no puede depender exclusivamente del mercado ni de sus actores, sino que debe estar inmerso en la planificación del desarrollo rural.

De conformidad con lo anterior, se deben considerar las siguientes premisas:

- La energía renovable es un recurso abundante y técnicamente aprovechable.
- Las tecnologías para el uso de las energías renovables ya están disponibles en el mercado.
- La energía renovable es para muchas localidades la más barata y la de mayor calidad.
- Los programas deben diseñarse con base en las necesidades y oportunidades locales.
- El mercado de los servicios energéticos rurales es un nicho de oportunidades para el establecimiento de nuevas empresas.
- La producción de energía para las redes centralizadas puede representar ingresos para las comunidades rurales.

Se supone que, en términos fundamentales, las políticas y regulaciones que definen los mercados de electricidad son “tecnológicamente neutras”; sin embargo, el marco regulatorio y las instituciones encargadas de su implementación se establecieron de acuerdo con las tecnologías de generación de electricidad disponibles hace varias décadas, debido a lo cual existe un sesgo a favor de las tecnologías convencionales y, por lo tanto, es necesario repensar dicho marco, considerando las particularidades de las energías renovables.

Las energías renovables ofrecen los siguientes beneficios con respecto a las provenientes de fuentes convencionales (*Vergara et al.* 2013):

- La industria de la electricidad renovable constituye una oportunidad significativa para atraer nuevas inversiones a la región;
- El patrón de generación de las energías renovables cambia con el tiempo y no suele ajustarse a la demanda; por consiguiente, es posible que estas generen electricidad solo cuando el recurso está disponible. En consecuencia, las reglas del mercado, el diseño de las redes de distribución y la interconectividad de la transmisión se deben ajustar a una generación variable.
- El patrón geográfico de las energías renovables es variable. Algunas de ellas, como la fotovoltaica, se encuentran en muchas partes, mientras que otras se hallan solo en ubicaciones específicas. Esta particularidad tiene consecuencias en términos de políticas y regulación, incluidos aspectos relacionados con el uso del suelo, el diseño y las especificaciones de las redes de transmisión y la existencia de reglas adecuadas para la integración de centrales eléctricas de pequeña escala.
- Las energías renovables generan varios beneficios sociales y ambientales que muchas veces pasan inadvertidos, debido a lo cual el mercado no les asigna ningún valor. Es por ello que se deben diseñar políticas y regulaciones que promuevan la consideración de tales beneficios en las decisiones de inversión.

De acuerdo con lo anterior, se debe tomar en cuenta estos beneficios y diferencias con respecto a las fuentes convencionales de energía, implementar mecanismos que compensen los sesgos actuales o cambiar del todo las reglas del mercado, a fin de contar con un campo de juego verdaderamente nivelado.

Las medidas necesarias para crear un entorno propicio para el desarrollo de las energías renovables, que se clasifican en primarias, secundarias y terciarias, trascienden las políticas relativas al sector energético, ya que influyen en los sectores financiero, medioambiental y de desarrollo rural.

- Las primarias son las medidas intrínsecamente relacionadas con el marco energético nacional, que permanecen en el ámbito de las instituciones que regulan y rigen el sector energético en cada país (p. ej., el Ministerio de Energía). Estas incluyen políticas y regulaciones vinculadas con el sector eléctrico, así como los planes de electrificación rural y de financiamiento directo para el desarrollo de proyectos de energías renovables.
- Las medidas secundarias, que no son específicas del sector energético, pero que afectan la viabilidad de los proyectos de energías renovables, guardan relación con políticas fiscales, de uso de suelo, de protección del medio ambiente y de financiamiento.
- Las medidas terciarias, que propician un entorno favorable para el desarrollo de los proyectos de energías renovables, habilitan la implementación eficiente de las medidas primarias y secundarias, mientras que dan indirectamente soporte al sector (aunque sus efectos no se pueden medir con facilidad ni atribuirse de forma directa a estas). Algunos ejemplos de estas medidas son la elaboración de estadísticas y la recopilación de datos en los planos nacional o regional sobre el precio de los combustibles fósiles.

La electrificación rural con energías renovables tiene el potencial de cumplir con al menos diez de los ODS.

- **Energía asequible y no contaminante**

- 1 Fin de la pobreza
- 4 Educación de calidad
- 8 Trabajo decente y crecimiento económico
- 2 Hambre cero

- 5 Igualdad de género
- 9 Industria, innovación e infraestructura
- 3 Salud y bienestar
- 6 Agua limpia y saneamiento
- 13 Acción por el clima

Cabe reiterar que ALC puede satisfacer sus necesidades energéticas futuras con eficacia en función de los costos mediante el uso de recursos renovables, ejercer un liderazgo mundial en estos temas y construir una economía sólida sobre cimientos sostenibles. Para ello se debe aprovechar la experiencia de los diferentes actores regionales (grupos comunitarios, organizaciones no gubernamentales, agencias de desarrollo, gobiernos locales y empresas, entre otros), así como el compromiso político de crear el marco propicio para la electrificación con energías renovables de todo el medio rural de ALC, a fin de convertir a nuestra región en una referencia mundial en este campo.

Bibliografía

AIE (Agencia Internacional de la Energía, Francia). 2009. World energy outlook 2009 (en línea). París. Consultado 20 de febrero de 2023. Disponible en <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ac80b701-bdfc-48cf-ac4c-00e60e1246a0/weo2009.pdf>.

AIE (Agencia Internacional de la Energía, Francia). 2016. World energy outlook 2016 (en línea). Consultado 20 de febrero de 2023. Disponible en <https://iea.blob.core.windows.net/assets/680c05c8-1d6e-42ae-b953-68e0420d46d5/WEO2016.pdf>

AIE (Agencia Internacional de la Energía, Francia). 2021. Net zero by 2050: a roadmap for the global energy sector (en línea). Consultado 20 de febrero de 2023. Disponible en <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>.

AIE (Agencia Internacional de la Energía, Francia). 2022. Understanding GEC model scenarios (en línea). Consultado 20 junio. 2022. Disponible en <https://www.iea.org/reports/world-energy-model/understanding-weo-scenarios#abstract>.

AIE (Agencia Internacional de la Energía, Francia); PNUD (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, Estados Unidos de América); ONUDI (Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial, Austria). 2010. Energy poverty: how to make modern energy access universal? (en línea). París. Consultado 20 de febrero de 2023. Disponible en <https://iea.blob.core.windows.net/assets/fdbdd604-de2c-4977-8a3f-20f93e68e738/HowtoMakeModernEnergyAccessUniversal.pdf>.

Arensol Ingeniería. 2022. Arensol ingeniería SAS (en línea). Consultado 20 de febrero de 2023. Disponible en <https://www.arensol.com/index.php/es/22-obras-off-grid/123-pueblo-solar-la-cienaga>.

Arias, A. 2017. OLADE: enfoque para proyectos de electrificación rural (en línea). EnerLAC Revista de Energía de Latinoamérica y el Caribe 1(1):6-23. Consultado 20 de febrero de 2023. Disponible en <https://enerlac.olade.org/index.php/ENERLAC/article/view/10/9>.

Banco Mundial. 2014a. Electricidad para las comunidades rurales en el Perú (en línea). Consultado 20 de febrero de 2023. Disponible en <https://www.bancomundial.org/es/results/2014/09/24/peru-brings-electricity-to-rural-communities>.

Banco Mundial. 2014b. Scaling up acces to electricity: the case of Bangladesh (en línea). (Serie Live Wire, v. 21). Consultado 20 de febrero de 2023. Disponible en www.wdronline.worldbank.org/bitstream/handle/10986/18679/887020BRI0Live00Box385194B00PUBLIC0.pdf?sequence=1.

Banco Mundial. 2017. State of Electricity Access Report (en línea). Consultado 20 de febrero de 2023. Disponible en <https://documents1.worldbank.org/curated/en/364571494517675149/pdf/114841-REVISED-JUNE12-FINAL-SEAR-web-REV-optimized.pdf>.

Bertheau, P. 2013. Global analysis of the utilization of diesel generators for remote power supply (en línea). Consultado 20 de febrero de 2023. Disponible en <https://reiner-lemoine-institut.de/en/global-analysis-of-the-utilization-of-diesel-generators-for-remote-power-supply/>.

BID (Banco Interamericano de Desarrollo, Estados Unidos de América). 2013. BID: América Latina y el Caribe podrían cubrir sus necesidades eléctricas con recursos renovables (en línea). Consultado 20 de febrero de 2023. Disponible en [https://www.iadb.org/es/noticias/bid-america-latina-y-el-caribe-podrian-cubrir-sus-necesidades-electricas-con-recursos#:~:text=La%20dotaci%C3%B3n%20de%20recursos%20de,Interamericano%20de%20Desarrollo%20\(BID\)](https://www.iadb.org/es/noticias/bid-america-latina-y-el-caribe-podrian-cubrir-sus-necesidades-electricas-con-recursos#:~:text=La%20dotaci%C3%B3n%20de%20recursos%20de,Interamericano%20de%20Desarrollo%20(BID)).

Breyer, C. 2012. Identifying off-grid diesel-grids on a global scale for economic advantageous upgrading with PV and wind power (en línea). In 5th ARE Workshop Academia Meets Industry (5, 2012, Frankfurt, Alemania). Consultado 20 de febrero de 2023. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/277012536_Identifying_Off-Grid_Diesel-Grids_on_a_Global_Scale_for_Economic_Advantageous_Upgrading_with_PV_and_Wind_Power.

CAMMESA (Compañía Administradora del Mercado Mayorista Eléctrico S. A., Argentina). 2022. Síntesis mensual (en línea). Consultado 20 de febrero de 2023. Disponible en <https://cammesaweb.cammesa.com/informe-sintesis-mensual/>.

Carreras, N. 2013. El biogás. Brasilia, Brasil, ONUDI. Consultado 20 de febrero de 2023.

Chiroque, J. 2008. Microaerogeneradores para la electrificación rural: caso de El Alumbre, Cajamarca. In Seminario Internacional de Energía Eólica (1, 2008, Lima, Perú). Consultado 20 de febrero de 2023.

Chiroque, J; Escobar, R; Ferrer-Martí, L; Garwood, A. 2009. El Alumbre: design, implementation and management of a community small-scale wind generation project (en línea). In International Workshop on Small Wind Energy for Developing Countries: Reliability, Materials and Case Studies (2009, Nairobi, Kenia). Consultado 20 de febrero de 2023. Disponible en <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/25910/El+alumbre.+design,+implementation+and+management+of+a+community+small-scale+wind+generation+project.pdf;jsessionid=EA71B854969840314DF3D7A3CD2AFDF0?sequence=1>.

CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe, Chile). 2021. Transición Energética: Hacia una mayor cooperación en integración energética regional en América Latina y el Caribe (en línea). Consultado 20 de febrero de 2023. Disponible en https://www.cepal.org/sites/default/files/events/files/rayen_quiroga.pdf.

CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe, Chile). 2022. Anuario estadístico de América Latina y el Caribe 2021 (en línea). Santiago. Consultado 20 de febrero de 2023. Disponible en https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/47827/1/S2100474_mu.pdf.

CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe, Chile). 2022. Los servicios básicos de agua potable y electricidad como sectores clave para la recuperación transformadora en América Latina y el Caribe (en línea). Recursos Naturales en América Latina y el Caribe 4. Consultado 20 de febrero de 2023. Disponible en <https://www.cepal.org/es/enfoques/servicios-basicos-agua-potable-electricidad-como-sectores-clave-la-recuperacion>.

Contreras, JL; Frantzis, L; Blazewicz, S; Pinault, D; Sawyer, H. 2008. Photovoltaics value analysis (en línea). Massachusetts, Estados Unidos de América, NREL. Consultado 20 de febrero de 2023. Disponible en <https://www1.eere.energy.gov/solar/pdfs/42303.pdf>.

Cunningham, R. E. 2003. La energía, historia de sus fuentes y transformación (en línea). Petrotecnia 7. Consultado 20 de febrero de 2023. Disponible en <https://www.ier.unam.mx/~rbb/ERyS2013-1/Historia-Energia.pdf>.

DGER (Dirección General de Electrificación Rural, Perú). 2020. Plan Nacional de Electrificación Rural (PNER): período 2021-2023 (en línea). Consultado 20 de febrero de 2023. Disponible en <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/1987203/PLAN%20NACIONAL%20DE%20ELECTRIFICACION%20C3%93N%20RURAL%202021%20-%202023.pdf.pdf>.

EJSED S. A. (Empresa Jujeña de Sistemas Energéticos Dispersos S. A., Argentina). 2022. Pueblos solares (en línea). Consultado 20 de febrero de 2023. Disponible en <https://ejse.com.ar/conocenos/pueblos-solares/>.

Fernández, E; Villar-Fernández, A; Montes-Romero, J; Ruiz-Torres, L; Rodrigo, PM; Manzaneda, AJ; Almonacid, F. 2022. Global energy assessment of the potential of photovoltaics for greenhouse farming (en línea). Applied Energy 309. Consultado 20 de febrero de 2023. Disponible en <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261921016974>.

Ferrer-Martí, L; Pastor, R; Ranaboldo, M; Miquel Capó, G; Velo, E. 2009. Electrificación rural con sistemas microeólicos: optimización del diseño (en línea). Consultado 20 de febrero de 2023. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/228822294_Electrificacion_rural_con_sistemas_microeolicos_optimizacion_del_diseno.

Forsberg, J. 2014. Biogas grid in Mälardalen Valley: report SGC 300 (en línea). Malmö, Suecia, SGC. Consultado 20 de febrero de 2023. Disponible en [http://www.sgc.se/ckfinder/userfiles/files/SGC300web\(1\).pdf](http://www.sgc.se/ckfinder/userfiles/files/SGC300web(1).pdf).

Fuente, M; Álvarez, M. 2004. Modelos de electrificación rural dispersa mediante energías renovables en América Latina: un planteo alternativo basado en el desarrollo rural (en línea). Cuaderno Urbano 4(4):203-229. Consultado 20 de febrero de 2023. Disponible en <https://revistas.unne.edu.ar/index.php/crn/article/view/1049>.

García, B; Martín-Peñasco, J. 2018. Pastoreo de ovejas para mantener las plantas solares del futuro (en línea, blog). Madrid, España, Telefónica. Consultado 20 de febrero de 2023. Disponible en <https://blogthinkbig.com/ovejas-paneles-solares>.

Hernández Gómez, R; Fernández Vicente, T; Martín González, MC; Mondéjar Montagud, ME; Chamorro Camazón, CR. 2015. Integration of biogas in the natural grid: thermodynamic characterization of a biogas-like mixture (en línea). The Journal of Chemical Thermodynamics 84:60-66. Consultado 20 de febrero de 2023. Disponible en <https://www.sciencedirect.com/journal/the-journal-of-chemical-thermodynamics/vol/84/suppl/C>.

Hub de Energía. 2022. Acceso al servicio de electricidad (en línea). Washington D. C., Estados Unidos de América, BID. Consultado 20 de febrero de 2023. Disponible en <https://hubenergia.org/index.php/es/indicators/acceso-al-servicio-de-electricidad#>.

IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, Suiza). 2011. Fuentes de energía renovables y mitigación del cambio climático (en línea). Consultado 20 de febrero de 2023. Disponible en <https://www.ipcc.ch/report/renewable-energy-sources-and-climate-change-mitigation/>.

IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, Suiza). 2021. Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (en línea). Consultado 20 de febrero de 2023. Disponible en https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WG1_SPM_Spanish.pdf

IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, Suiza). 2022a. Summary for Policymakers. In: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (en línea). Consultado 20 de febrero de 2023. Disponible en https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/downloads/report/IPCC_AR6_WGII_SummaryForPolicymakers.pdf

IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, Suiza). 2022b. Summary for Policymakers. In: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (en línea). Consultado 20 de febrero de 2023. Disponible en https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_SummaryForPolicymakers.pdf.

IRENA (Agencia Internacional de Energías Renovables, Emiratos Árabes Unidos). 2012. Key findings and recommendations (en línea). IOREC 2012: International Off-Grid Renewable Energy Conference (1, 2012, Abu Dabi, Emiratos Árabes Unidos). Abu Dabi, Emiratos Árabes Unidos. 50 p. Consultado 20 de febrero de 2023. Disponible en https://iorec.irena.org/-/media/Files/IRENA/IOREC/2012/IOREC_Key-Findings-and-Recommendations.pdf.

IRENA (Agencia Internacional de Energías Renovables, Emiratos Árabes Unidos). 2013. Pacific lighthouses: renewable energy roadmapping for islands (en línea). Consultado 20 de febrero de 2023. Disponible en <https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2013/Pacific-Lighthouse-Roadmapping.pdf>.

IRENA (Agencia Internacional de Energías Renovables, Emiratos Árabes Unidos). 2017. Biogas for road vehicles: technology brief (en línea). Consultado 20 de febrero de 2023. Disponible en <http://www.irena.org/publications/2017/Mar/Biogas-for-road-vehicles-Technology-brief>.

IRENA (Agencia Internacional de Energías Renovables, Emiratos Árabes Unidos). 2020. Perspectivas mundiales de las energías renovables: transformación energética de aquí a 2050 (en línea). Abu Dabi. Consultado 20 de febrero de 2023. Disponible en <https://www.irena.org/publications/2020/Apr/Global-Renewables-Outlook-2020>.

IRENA (Agencia Internacional de Energías Renovables, Emiratos Árabes Unidos). 2021. Renewable power generation costs in 2020 (en línea). Abu Dabi. 20 de febrero de 2023. Disponible en https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Jun/IRENA_Power_Generation_Costs_2020.pdf

IRENA (Agencia Internacional de Energías Renovables, Emiratos Árabes Unidos). 2022. Estadísticas de energía renovable 2022 (en línea). Abu Dabi. Consultado 20 de febrero de 2023. Disponible en https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Jul/IRENA_Renewable_energy_statistics_2022.pdf?rev=8e3c22a36f964fa2ad8a50e0b4437870.

Jury, C; Benetto, E; Koster, D; Schmitt, B; Weltring, J. 2010. Life cycle assesment of biogas production by monofermentation of energy crops and injection into the natural gas grid (en línea). *Biomass and Bioenergy* 34(1):54-66. Consultado 20 de febrero de 2023. Disponible en <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0961953409002025>.

Kempener, R; Lavagne d'Ortigue, O; Saygin, D; Skeer, J; Vinci, S; Gielen, D. 2015. Off-grid renewable energy systems: status and methodological issues (en línea). Abu Dabi, Emiratos Árabes Unidos, IRENA. Consultado 20 de febrero de 2023. Disponible en https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2015/IRENA_Off-grid_Renewable_Systems_WP_2015.pdf.

Laboratorio de Vigilancia Mundial (Estados Unidos de América). 2023. Carbon Cycle Greenhouse Gases research area at Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (en línea). Consultado 20 de febrero de 2023. Disponible en <https://gml.noaa.gov/ccgg/>.

López-Savran, A; Suárez-Hernández, J. 2018. Experiencia de suministro de biogás en una comunidad rural, en Cuba (en línea). *Pastos y forrajes* 41(1):73-79. Consultado 20 de febrero de 2023. Disponible en <https://www.redalyc.org/journal/2691/269158212010/html/>.

MEcon (Ministerio de Economía, Argentina). 2022. PERMER inicia obras para abastecer de energía solar y eólica a comunidad rural de Río Negro (en línea). Buenos Aires. Consultado 20 de febrero de 2023. Disponible en <https://www.argentina.gob.ar/noticias/permer-inicia-obras-para-abastecer-de-energia-solar-y-eolica-comunidad-rural-de-rio-negro>.

MEyM (Ministerio de Energía y Minería, Argentina). 2017. Energía: aseguramos el abastecimiento de energía para un país en desarrollo (en línea). Consultado 20 de febrero de 2023. Disponible en <http://www.energia.gob.ar/contenidos/verpagina.php?i-dpagina=3622>.

Navigant. 2014. Micro-grid deployment tracker 2Q14: executive summary (en línea). Consultado 20 de febrero de 2023. Disponible en www.navigantresearch.com/wp-content/uploads/2012/11/MGDT-4Q12-Executive-Summary.pdf.

ONU. Sf. Objetivo 7—Garantizar el acceso a una energía asequible, fiable, sostenible y moderna para todos (en línea). Consultado 20 de febrero de 2023. Disponible en <https://www.un.org/es/chronicle/article/objetivo-7-garantizar-el-acceso-una-energia-asequible-fiable-sostenible-y-moderna-para-todos>.

Rodríguez, AG; Mondaini, AO; Hitschfeld, MA. 2017. Bioeconomía en América Latina y el Caribe: contexto global y regional y perspectivas (en línea). Santiago, Chile, CEPAL. (Serie Desarrollo Productivo, v. 215). Consultado 20 de febrero de 2023. Disponible en https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/42427/S1701022_es.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

Schmukler, M. 2018. Electrificación rural en Argentina: alcances y limitaciones del Programa de Energías Renovables en Mercados Rurales (PERMER) en la provincia de Jujuy (en línea). Tesis Mgtr. Bernal, Argentina, UNQ. 154 p. Consultado 20 de febrero de 2023. Disponible en <http://ridaa.unq.edu.ar/handle/20.500.11807/893>.

Schramm, G. 1993. Rural electrification in LDCs as a tool for economic development: facts and fiction. Reino Unido, OPEP. Consultado 20 de febrero de 2023.

SENER (Secretaría de Energía, México). 2012. Prospectivas de energías renovables 2012-2016. Ciudad de México. Consultado 20 de febrero de 2023. Disponible en https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/62954/Prospectiva_de_Energ_as_Renovables_2012-2026.pdf.

Tatlidil, FF; Bayramoglu, Z; Akturk, D. 2009. Animal manure as one of the main biogas production resources: case of Turkey (en línea). *Journal of Animal and Veterinary Advances* 8(12):2473-2476. Consultado 20 de febrero de 2023. Disponible en <https://medwelljournals.com/abstract/?doi=javaa.2009.2473.2476>.

Torroba, A; Brenes Porras, C; Pino Donoso, M; y Pedraza, G. (2023). Estado actual de la biodigestión en América Latina y el Caribe. IICA y RedBioLAC. San José, Costa Rica.

Tozzi Green. 2022. La electrificación rural en Perú y el papel de Ergon (en línea). Lima, Perú. Consultado 20 de febrero de 2023. Disponible en <https://www.tozzigreen.com/es/proyecto/leletrificazione-rurale-peru-ruolo-ergon/>.

Van Campen, B; Guidi, D; Best, G. 2000. Energía solar fotovoltaica para la agricultura y desarrollo rural sostenibles. Roma, Italia, FAO. 92 p. Consultado 20 de febrero de 2023. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/280727475_Energia_solar_fotovoltaica_para_la_agricultura_y_desarrollo_rural_sostenibles.

Vergara, W; Alatorre, C; Alves, L. 2013. Repensemos nuestro futuro energético: un documento de discusión sobre energía renovable para el Foro Regional 3GFLAC (en línea). BID. Consultado 20 de febrero de 2023. Disponible en <https://publications.iadb.org/publications/spanish/viewer/Repensemos-nuestro-futuro-energ%C3%A9tico-Un-documento-de-discusi%C3%B3n-sobre-energ%C3%ADa-renovable-para-el-Foro-Regional-3GFLAC.pdf>.

Vidal, L. 2013. Qué es un biodigestor y cómo implementarlo en casa (en línea). Bioquía. Consultado 20 de febrero de 2023. Disponible en https://www.bioguia.com/innovacion/biodigestores_29295392.html.

Werner, C; Breyer, C. 2012. Analysis of mini-grid installations: an overview on system configurations (en línea). Documento de conferencia. Conferencia Europea sobre Híbridos Fotovoltaicos y Minirredes. (6, 2012, Chambéry, Francia). Alemania. Consultado 20 de febrero de 2023. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/282154760_Analysis_of_Mini-Grid_Installations_An_Overview_of_System_Configurations.

Anexo 1. Papel de las energías renovables en el proceso de descarbonización, de acuerdo con distintos escenarios de la IRENA

a. Escenarios

En 2020 la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA) publicó el informe intitulado *Perspectivas mundiales de las energías renovables: transformación energética de aquí a 2050*, a través del cual se daba continuidad a la serie de informes en los que se explora la viabilidad técnica y los beneficios socioeconómicos de la descarbonización global a largo plazo (referencia 2050) (IRENA 2020). En este estudio en particular la IRENA definió cuatro escenarios para explorar los distintos contextos en materia energética y las trayectorias requeridas para alcanzar determinados objetivos de descarbonización, tomando en cuenta el panorama socioeconómico *ex ante* y *ex post* para cada situación.

De acuerdo con la IRENA (2020), el análisis socioeconómico de estos escenarios se realiza por medio de un modelo macroeconómico (el modelo E3ME) que vincula el sistema energético y las economías mundiales en un marco cuantitativo único y coherente. Se examina el impacto de la transición energética con variables como el producto interno bruto (PIB), el empleo y el bienestar para informar la planificación del sistema energético, la elaboración de políticas económicas y otras medidas para garantizar una transición energética justa e inclusiva en los ámbitos mundial, regional y nacional.

El informe se fundamenta no solo en el enfoque de hoja de ruta de las energías renovables de la IRENA, que desde 2014 constituye la base de una sucesión de análisis globales regionales, nacionales y sectoriales, sino también en el análisis socioeconómico de esta Agencia, que captura una imagen cada vez más completa del impacto de la transición energética en las economías y las sociedades. Se exploran estas posibles vías para la inversión en energía y un desarrollo socioeconómico más amplio en el crucial plazo de tres décadas que resta hasta mediados de este siglo. En este informe se consideran los objetivos y la evolución de las políticas hasta abril de 2019 (IRENA 2020).

Los cuatro escenarios definidos por la IRENA: 1) el escenario energético planificado (PES), 2) el escenario de transformación energética (TES), 3) la perspectiva de descarbonización más profunda (DDP) y 4) el escenario energético de referencia (BES) se detallan a continuación.

El PES es el principal caso de referencia del estudio. Ofrece una perspectiva sobre la evolución del sistema energético basada en los planes energéticos de los Gobiernos y otros objetivos y políticas planificados (a partir de 2019), incluidas las contribuciones determinadas a nivel nacional dentro del Acuerdo de París, a menos de que el país tenga objetivos o planes climáticos y energéticos más recientes.

En el TES se describe una vía de transformación energética ambiciosa, pero realista, apoyada en gran medida en las fuentes de energía renovables y en la mejora constante de la eficiencia energética (aunque no se limita exclusivamente a estas tecnologías). Esto situaría al sistema energético en la senda requerida para mantener el aumento de la temperatura global muy por debajo de los 2 °C y hacia los 1.5 °C durante este siglo.

La DDP se basa en opciones adicionales para reducir aún más las emisiones de CO₂ relacionadas con la energía y los procesos industriales más allá del TES. Sugiere posibilidades de acción acelerada en áreas específicas para reducir a cero las emisiones de CO₂ relativas a la energía y los procesos durante el período 2050-2060.

El BES refleja las políticas que estaban en vigor en el momento del Acuerdo de París en 2015, añadiendo una visión histórica reciente sobre la evolución de la energía cuando es necesario.

b. Papel de las energías renovables en la descarbonización

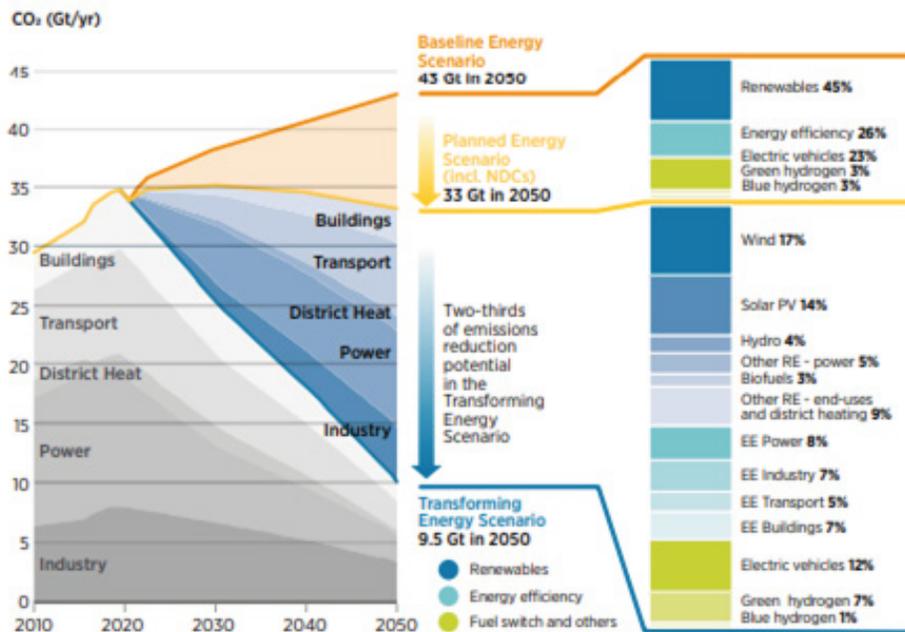
Acorde con el objetivo climático global de alcanzar las emisiones cero para 2050 o incluso más allá, bajo la lógica de aprovechamiento de los recursos tecnológicos existentes y estrategias alternativas de reducción de emisiones, las energías renovables tradicionales, en conjunto con el hidrógeno y los combustibles sintéticos, la electrificación directa, biocombustibles avanzados y gestión del carbono, representarán elementos con labores fundamentales en la concatenación de aquellas metas tanto ambiciosas como laxas. Por consiguiente, a continuación, se presentan los escenarios posibles de desarrollo y la caracterización de cada uno en el tiempo.

1. PES

Si se cumplen los planes y compromisos de los países, tal y como se refleja en el PES, se espera que las emisiones de CO₂ relacionadas con la energía aumenten cada año hasta 2030, antes de descender ligeramente en 2050 hasta situarse justo por debajo del nivel actual. Las disminuciones resultantes de pasar del BES al PES reducen las emisiones anuales de CO₂ en 9.9 Gt. Casi la mitad de las disminuciones son el resultado de las energías renovables, mientras que una cuarta parte procede de la eficiencia energética y el resto, de la electrificación del uso final, principalmente de los vehículos eléctricos. Esto demuestra cómo han cambiado los planes de los Gobiernos en los últimos años, reflejando la evolución positiva de las energías renovables y los vehículos eléctricos.

En el PES la proporción de energía renovable moderna en el suministro de energía final aumentaría al 17 % en 2030 y al 25 % en 2050.

ILUSTRACIÓN 26. EL USO DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES, LA EFICIENCIA ENERGÉTICA, LOS VEHÍCULOS ELÉCTRICOS Y EL HIDRÓGENO PUEDEN REDUCIR EN 2050 EL CONJUNTO REQUERIDO DE EMISIONES.



Fuente: Tomado de IRENA 2020.

La bioenergía sería cada vez más vital en los sectores de uso final. Hoy la bioenergía constituye una gran parte del uso de las energías renovables y seguirá siendo una fuente importante de combustible para la generación de electricidad y calor en la industria y como combustible utilizado en el transporte. En el PES la parte de la energía primaria que se satisface con la bioenergía moderna (que excluye los usos tradicionales del biocombustible) aumentaría del 5 % actual al 10 %.

2. TES

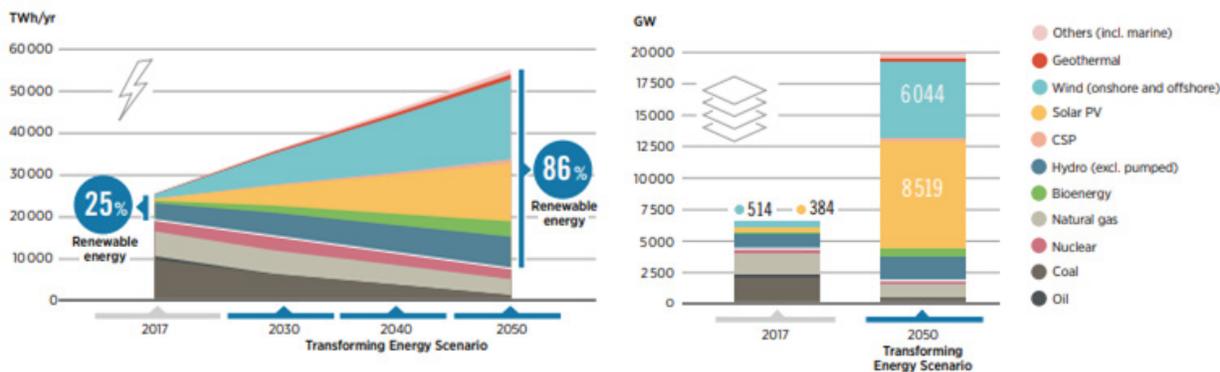
En el TES la estructura energética se intensificaría, apuntando a objetivos de descarbonización más ambiciosos. Las energías renovables y la eficiencia energética ofrecen conjuntamente más del 90 % de las medidas de mitigación necesarias para reducir las emisiones relacionadas con el sector energético. Para lograr esta reducción, las emisiones de CO₂ relativas a la energía deben disminuir 3.8 % anual promedio hasta 2050, es decir, hasta 70 % por debajo del nivel actual. Esto se compara con un aumento medio anual del 1 % durante la última década, con una estabilización en 2019 (IRENA 2020).

De conformidad con lo anterior, el cambio a la energía renovable podría reducir las emisiones de CO₂ del sector eléctrico en 64 %, en comparación con el PES, mientras que la electrificación profunda de los sectores de uso final podría reducir las emisiones de los edificios, el transporte y la industria en 25 %, 54 % y 16 %, respectivamente. De esta manera, el impacto global de la electrificación con energías renovables reduciría las emisiones totales del sector energético en más de 60 %, en comparación con el PES. Todas estas sinergias en su conjunto conseguirían la reducción de las emisiones de más de 90 % antes descrita, lo que es compatible con el objetivo climático muy inferior a 2 °C establecido en el Acuerdo de París.

Para alcanzar estos ratios porcentuales, la proporción de energía renovable moderna en el suministro de energía final debería aumentar 17 % en 2030 y 25 % en 2050, según el PES, y 28 % en 2030 y 66 % en 2050, de acuerdo con el TES. Por lo tanto, la cuota tendría que multiplicarse por seis en comparación con la actual, y por dos y medio en relación con el PES (IRENA 2020).

Otro aspecto por destacar es la sinergia necesaria entre la combinación de tecnologías de energía renovable de bajo costo creciente y la adopción más amplia de la electricidad para aplicaciones de uso final en el transporte y la producción de calor e hidrógeno. Para llevar a cabo la transición energética al ritmo y la escala necesarios, se requeriría la descarbonización casi total del sector eléctrico en 2050. El TES establece un camino para lograr una cuota de 86 % de energías renovables en la combinación de generación de energía en 2050. En cuanto al uso final, la proporción de la electricidad en el consumo final de energía aumentaría del 20 % actual a casi el 50 % en 2050. El porcentaje de electricidad consumida en la industria y los edificios se duplicaría. En el transporte pasaría del 1 % actual a más del 40 % en 2050 (IRENA 2020).

ILUSTRACIÓN 27. ENERGÍAS SOLAR Y EÓLICA Y OTRAS FUENTES RENOVABLES DE GENERACIÓN ENERGÉTICA HASTA 2050.



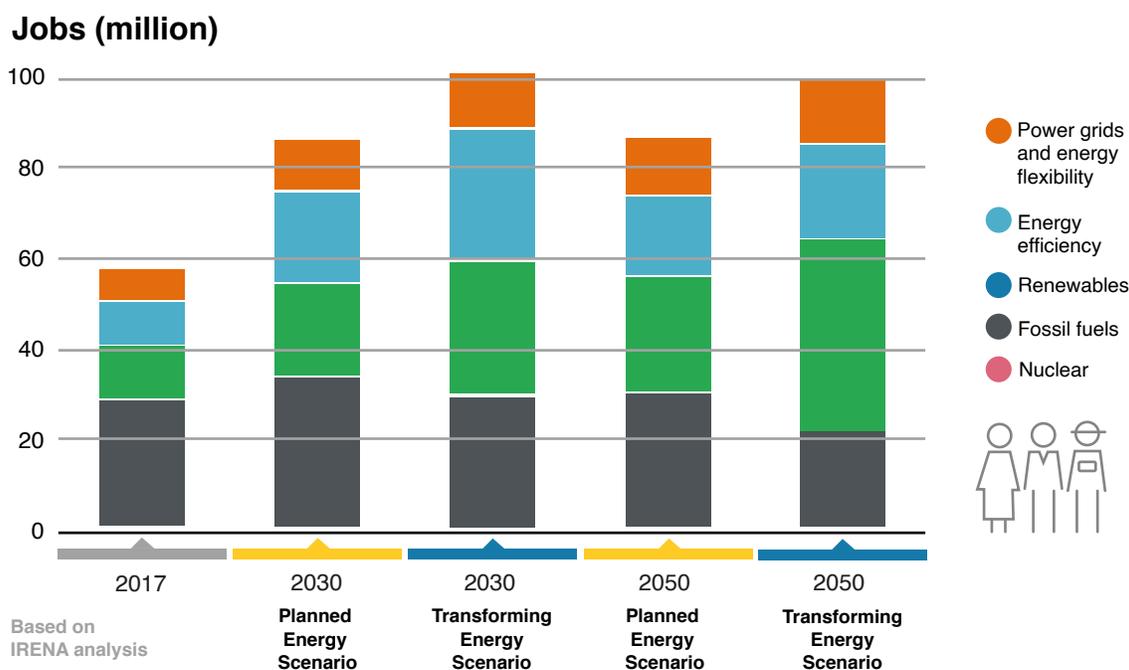
Fuente: Tomado de IRENA 2020.

La energía solar fotovoltaica y la eólica liderarían la transformación del sector eléctrico mundial. La energía eólica sería una de las principales fuentes de electricidad, ya que satisfaría más de un tercio de la demanda total de esta. Le seguiría la energía solar fotovoltaica, que satisfaría el 25 % de la demanda total de electricidad, lo que representaría multiplicar por más de 10 la participación de la energía solar fotovoltaica en la generación combinada para 2050 con respecto a los niveles de 2017. En el contexto de la capacidad total instalada en 2050, se necesitaría una expansión de la capacidad mucho mayor para la energía solar fotovoltaica (8519 GW), en comparación con la eólica (6044 GW) (IRENA 2020).

Complementariamente, en el futuro la energía hidráulica puede aportar importantes sinergias a un sistema energético. Como señala la IRENA (2020), la energía hidroeléctrica desempeñará un papel importante en la integración de mayores porcentajes de energía renovable variable, lo que ayudaría a contrarrestar la variabilidad a corto plazo de la generación eólica y solar, así como la complementariedad estacional de los patrones de recursos. En el TES la capacidad hidroeléctrica aumentaría en dos tercios hasta alcanzar los 2147 GW en 2050, en comparación con los niveles actuales. En otras palabras, se necesitan unos 850 GW de nueva capacidad instalada en los próximos 30 años.

Tecnologías modernas como la de la bioenergía desempeñarían un papel importante, especialmente en sectores difíciles de electrificar, como los de la navegación y la aviación, así como en la industria, en relación con el calor de proceso y la materia prima. En el TES la cuota de energía primaria satisfecha con bioenergía moderna aumentaría hasta en 23 %, mientras que los usos tradicionales de la bioenergía, que en la actualidad cubren una gran parte de su demanda, deberían ser eliminados de forma gradual y sustituidos por opciones más limpias, como la bioenergía moderna y otras energías renovables (IRENA 2020).

ILUSTRACIÓN 28. CRECIMIENTO DEL EMPLEO EN EL SECTOR ENERGÉTICO, QUE ALCANZARÍA LOS 100 MILLONES EN 2050.



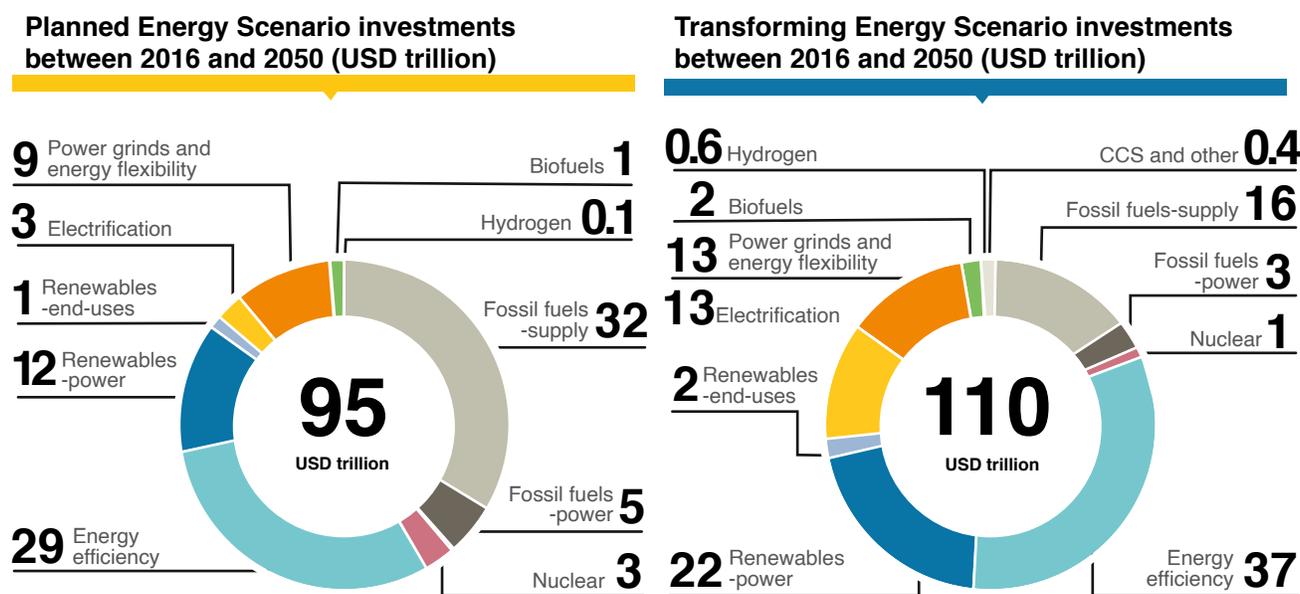
Fuente: Tomado de IRENA 2020.

• Aspectos laborales

En materia laboral el TES impulsaría el empleo en el sector energético, particularmente el relacionado con las tecnologías clave en la transición (energías renovables, eficiencia y flexibilidad energéticas y redes eléctricas). Dada esta vorágine, se espera que los nuevos puestos de trabajo en tecnologías y sectores asociados con la transición superen las pérdidas de empleo relativas a los combustibles fósiles y la energía nuclear. Las inversiones previstas en el TES estimularían un considerable crecimiento del empleo, la mayor parte de forma directa en las energías renovables, el cual ascendería a 42 millones de puestos de trabajo en 2050. Esto supone 64 % más de lo previsto en el PES y casi cuatro veces el número de puestos de trabajo del sector en la actualidad. La energía solar fotovoltaica representaría casi la mitad de estos empleos, seguida por la bioenergía y la energía eólica. Entre los segmentos de la cadena de valor de las energías renovables dominarían los empleos de construcción e instalación, que representarían el 47 % del total. En cuanto al perfil ocupacional, los trabajadores de la construcción y de las fábricas, junto con los técnicos constituirían el 77 % del empleo total (IRENA 2020).

Según el TES, en 2050 la distribución regional del empleo en materia de energías renovables variaría de manera considerable. Llegaría al 36 % en Asia Oriental, pero solo representaría el 1 % en Oceanía, lo que reflejaría en gran medida el tamaño de las poblaciones, la mano de obra y las inversiones. En términos de tecnología, la energía solar representaría la mitad de los empleos en América del Norte y Asia, seguidas por Europa con el 30 %. La bioenergía superaría el 60 % de los puestos de trabajo en energías renovables en América Latina, el sudeste asiático, África subsahariana y Europa. La energía eólica, que sería más fuerte en Asia Oriental y la Unión Europea, generaría cerca del 25 % de los empleos, mientras que en América del Norte, el Oriente Medio y el norte de África rondaría el 15 % de ellos. Los empleos en el sector hidroeléctrico representarían el 15 % de todos los puestos de trabajo en energías renovables en el resto de Asia y el 10 % en América Latina y la región del Medio Oriente y el norte de África (IRENA 2020).

ILUSTRACIÓN 29. INVERSIONES EN ENERGÍA DURANTE EL PERÍODO 2016-2050.



Fuente: Tomado de IRENA 2020.

Finalmente, para cumplir las trayectorias en el sector energético se requiere aumentar y reorientar las inversiones hacia tecnologías energéticas limpias. De acuerdo con la IRENA (2020), las inversiones en combustibles fósiles deben ser reorientadas hacia las energías renovables y la eficiencia energética, mientras que las subvenciones a los combustibles fósiles deben ser eliminadas. En términos generales, en el TES la inversión total en el sistema energético tendría que alcanzar los USD 110 billones en 2050, es decir, alrededor del 2 % del PIB promedio anual durante el período indicado. De ese total, más del 80 % se debe invertir en energías renovables (25 %), eficiencia energética (34 %) y electrificación del uso final, redes eléctricas y flexibilidad (23 %). Es necesario invertir USD 3, 2 billones en el sistema energético mundial cada año hasta 2050 (IRENA 2020).

3. DDP

De conformidad con la IRENA (2020), la DDP no constituye un escenario en sí misma, sino una mejora de las opciones tecnológicas adicionales en el ámbito del TES. En sectores difíciles como los del transporte de mercancías, el transporte marítimo, la aviación y la industria pesada, se requerirían avances en materia de biocombustibles, combustibles sintéticos, nuevos materiales y economía circular. En muchos países la industria es el sector que presenta el mayor consumo de energía, como en China, donde consume alrededor de la mitad de la energía final. Es urgente encontrar soluciones para sectores clave como el siderúrgico, el cementero y el petroquímico, que constituyen la mayor parte de la demanda energética de la industria. Además, se requiere innovación para hallar soluciones con cero emisiones de CO₂ en los procesos industriales y los usos no energéticos en estos sectores (IRENA 2020).

Existen dos enfoques generales para reducir las emisiones a cero: descarbonizar completamente todos los procesos energéticos e industriales (el enfoque de emisiones cero) o compensar cualquier emisión restante mediante la eliminación de dióxido de carbono (CDR) para lograr emisiones netas cero (el enfoque de las cero emisiones netas). Algunos ejemplos de CDR son la reforestación, la forestación, la captura directa del aire, la mejora de la intemperie y la captura y almacenamiento de carbono (CAC) de la bioenergía. De acuerdo con la IRENA (2020), la combinación óptima de estos dos enfoques (cero y cero neto) debe seguir siendo explorada, sobre todo teniendo en cuenta la incertidumbre en torno a los tipos de tecnologías y soluciones que podrían reducir estas emisiones restantes.

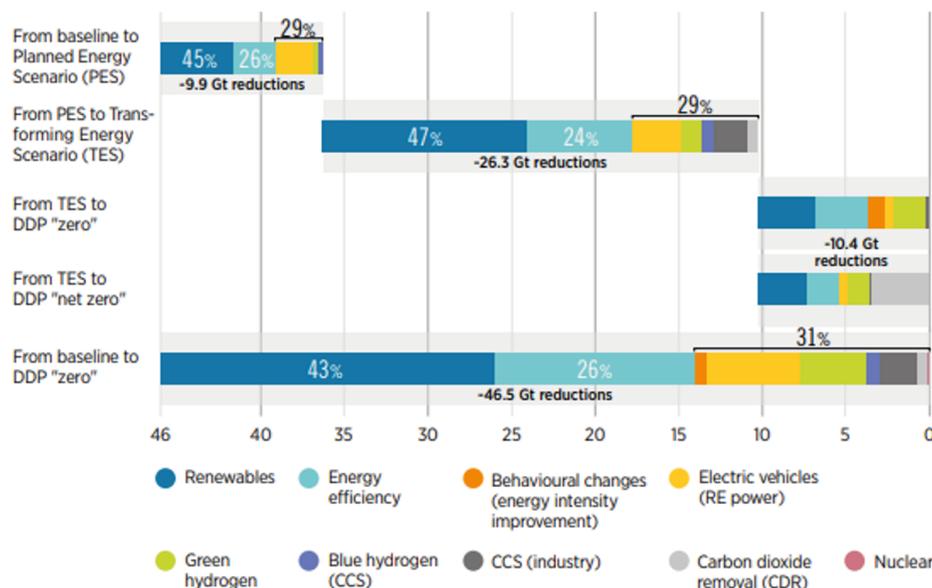
La DDP no constituye un nuevo escenario, sino que explica los dos tipos de enfoques que podrían reducir aún más las emisiones restantes en el TES, con el fin de alcanzar emisiones cero o netas cero. Las escalas de tiempo en las que estos enfoques podrían aplicarse son también muy inciertas. Dado que alcanzar el TES en 2050 ya constituye un reto importante, las medidas adicionales descritas en la DDP pueden requerir más tiempo para su plena aplicación. El siguiente análisis parte de la base de que el objetivo político es lograr los enfoques de emisiones “netas cero” o “cero” en la década siguiente a 2050 (IRENA 2020).

Si bien es cierto que la DDP involucra el impulso definitivo hacia la neutralidad climática, esta última parte de la descarbonización es la más difícil y costosa. Una transición energética ambiciosa seguiría dejando las emisiones mundiales en un tercio de sus niveles actuales, mientras que las industrias de alto consumo energético, el transporte marítimo y la aviación seguirían generando emisiones considerables en 2050. Aunque queda mucho por ver, la IRENA (2020) calcula que el 60 % de las reducciones en este tramo final podrían derivarse de las energías renovables, el hidrógeno verde y la electrificación basada en las energías renovables.

La innovación seguiría siendo crucial para abordar el problema de la difícil electrificación de ciertos medios de transporte, es decir, de la aviación y el transporte marítimo. Las energías renovables representan el 60 % de la reducción requerida, cuando se incluyen el hidrógeno verde y la electrificación basada en ellas; el 37 % de las reducciones provienen de la eficiencia energética y de otros cambios estructurales y de comportamiento; y el 3 % restante, de la captura, el uso y el almacenamiento de carbono y de la energía nuclear. En general, si se consideran las reducciones de las emisiones de CO₂ relacionadas con la energía y los procesos industriales desde el BES hasta cero, las energías renovables representan el 43 % de las reducciones, la eficiencia energética, el 26 %, los

vehículos eléctricos, el 12 %, el hidrógeno verde, el 9 %, el hidrógeno azul, la CAC y la CDR, el 7 %, los cambios de comportamiento, el 2 %, y la energía nuclear, menos del 1 % (los vehículos eléctricos y los cambios de comportamiento podrían considerarse también parte de la eficiencia energética o, en el caso de los vehículos eléctricos, de las energías renovables, si se alimentan de electricidad renovable) (IRENA 2020).

ILUSTRACIÓN 30. POTENCIAL DE MITIGACIÓN POR CONJUNTO DE TECNOLOGÍAS POR ESCENARIO DURANTE EL PERÍODO 2020-2050.



Fuente: Tomado de IRENA 2020.

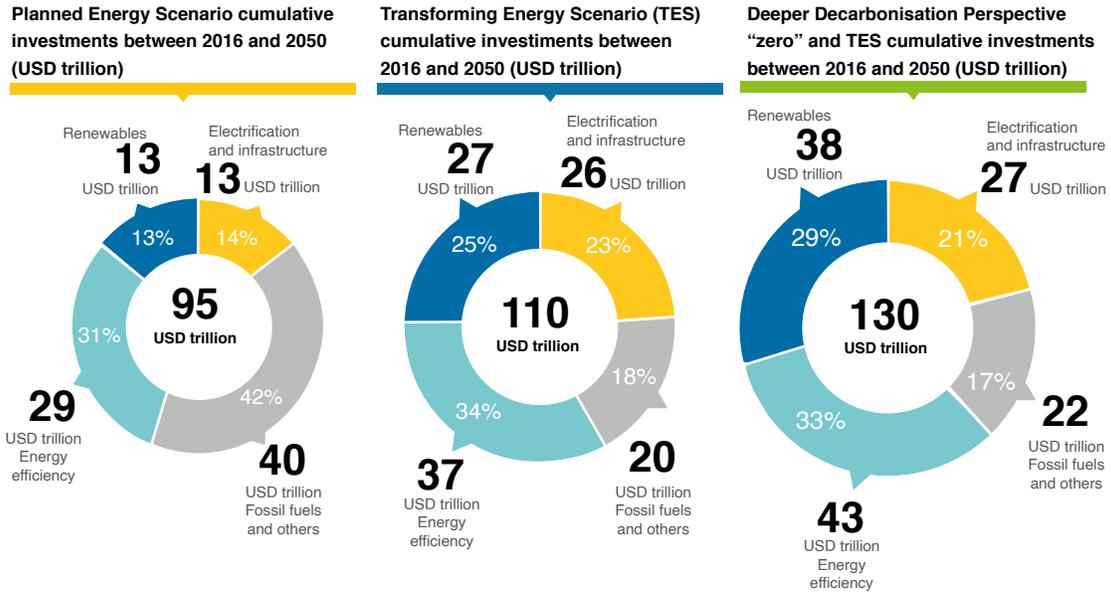
Con el enfoque de “emisiones netas cero” de la DDP estas emisiones restantes relacionadas con la energía se reducen a 3.4 Gt; por lo tanto, se requiere una cantidad igual de sumideros de carbono para compensar estas emisiones y llegar a emisiones netas cero, aunque no se define el tipo de sumidero de carbono. A través de medidas políticas sólidas y una innovación acertada es posible reducir las emisiones de DDP de estos sectores a cero, sin necesidad de sumideros de carbono. El enfoque “cero” de la DDP supone un mayor despliegue tecnológico, además de cambios estructurales y de comportamiento, para llegar a las emisiones totalmente nulas (IRENA 2020).

En el enfoque “cero” de la DDP se reducen a cero las 10.4 Gt restantes de emisiones anuales de CO₂. La importancia que revisten las energías renovables, la eficiencia energética y otros enfoques en dicha reducción es aproximadamente la misma, ya que la contribución de cada uno de ellos corresponde a un tercio del total de reducción. Entre los demás, el hidrógeno verde (que incluye los combustibles sintéticos y su uso como materia prima) es el más importante. Otro gran contribuyente a las reducciones es la CDR, que disminuye la reducción requerida en los otros enfoques (IRENA 2020).

En general, si se observan las agrupaciones tecnológicas que permiten reducir las emisiones anuales de CO₂ relacionadas con la energía y los procesos industriales (un descenso desde el valor del BES de 46.5 Gt, hasta un valor de cero en el enfoque “cero” de la DDP), las energías renovables representan el 43 %, la eficiencia energética y los cambios estructurales, el 26 %, los vehículos eléctricos, el 12 %, el hidrógeno verde, el 9 %, y una mezcla de hidrógeno azul, CAC, cambios de comportamiento y energía nuclear, el resto (IRENA 2020).

ILUSTRACIÓN 31. INVERSIÓN POR ESCENARIO, INCLUIDA LA DDP.

Figure S.8. New investment priorities:
Renewables, efficiency and electrification of heat and transport



Fuente: Tomado de IRENA 2020.

Para el cumplimiento de la DDP se requeriría una inversión adicional de USD 20 billones por encima de los USD 110 billones de inversiones en el TES, lo que supone una necesidad total de inversión de USD 130 billones para alcanzar las emisiones cero (IRENA 2020).

Anexo 2. Consideraciones básicas para un estudio de prefactibilidad y el diseño de instalaciones de generación de energías renovables en zonas rurales

La generación distribuida es la producción de energía eléctrica en el punto donde se genera la demanda o cerca de este. Los equipos de generación distribuidos pueden atender cargas diversas, dirigidas incluso a aplicaciones productivas. Pueden ser híbridos o funcionar totalmente con energías renovables. Se pueden conectar a la red eléctrica y, si hay excedentes, se inyectan a la red de distribución o se aíslan para generar energía eléctrica solo para el autoconsumo o para minirredes aisladas.

Entre las ventajas de la generación distribuida con fuentes renovables podemos destacar:

- El acceso a la energía eléctrica en zonas rurales aisladas de la red de distribución,
- La reducción de las pérdidas en las puntas de línea en las redes de distribución eléctrica,
- Una mayor fiabilidad y una mejor calidad del sistema,
- Potencias reducidas,
- Una generación más limpia de energía y
- La disminución de la dependencia externa y la creación de una red más resistente.

El acceso a la energía (sobre todo a la electricidad) es de suma importancia para el desarrollo de los países, en particular en términos de disminución de la pobreza, producción y cocción de los alimentos, generación de empleo, mejoramiento de la seguridad, uso de servicios digitales y aumento en los ingresos. Debido a esto en todo el mundo se han multiplicado los esfuerzos dirigidos a reducir la brecha entre quienes acceden y quienes no acceden a ella; no obstante, según varios autores, en las zonas rurales dicha reducción ha resultado más compleja, debido a su problemática y particularidades (Fuente y Álvarez 2004, Schmukler 2018).

La promoción de acciones que impulsen la electrificación rural, sin otras acciones orientadas a la creación de infraestructura o de capacidades productivas adicionales, no han logrado fomentar el desarrollo económico requerido. La electrificación rural debe formar parte de un desarrollo rural integral, por medio de un enfoque sistémico y no meramente asistencialista. Los programas de electrificación rural distribuidos deben promover el establecimiento de microempresas de servicios, estimular usos productivos no tradicionales y crear fuentes de trabajo en cada una de las comunidades. A continuación se describen los diferentes pasos de un estudio de prefactibilidad y del diseño de una instalación de energías renovables en una zona rural desde el punto de vista técnico. Cabe mencionar que, cuando se analiza la viabilidad de la electrificación de una zona aislada, se debe realizar un estudio más amplio desde la dimensión socioeconómica para definir la implementación de la tecnología, a fin de lograr el desarrollo integral de la comunidad.

Entre las principales consideraciones para la instalación de sistemas de generación distribuidos en zonas rurales se destacan las siguientes:

- Los sistemas y componentes individuales deben ser robustos, a prueba de manipulaciones y fáciles de usar;
- Se deben utilizar conductores de potencia adecuados para las cargas por abastecer;
- Es necesario determinar correctamente la carga que deberá alimentar el sistema y evitar una sobrecarga derivada de una utilización excesiva.

El estudio de prefactibilidad y el diseño de la instalación de generación de energía eléctrica a partir de fuentes renovables puede dividirse en tres etapas que se describen a continuación.

• Diagnóstico

El objetivo básico del diagnóstico es determinar si la demanda eléctrica por cubrir es *on-grid* u *off-grid* y si el potencial teórico o bruto se puede obtener con los recursos renovables disponibles.

En primer lugar, se debe definir la zona geográfica donde se desea solucionar el problema de acceso a la energía eléctrica o mejorar el servicio de la red local con generación local.

En esta primera etapa hay que determinar:

1. El problema por resolver
 - a. El acceso a la energía eléctrica o
 - b. La mejora de la calidad del servicio en “puntas de línea” de redes eléctricas rurales
2. Las necesidades de consumo eléctrico
3. Los recursos renovables disponibles
 - a. Solares
 - b. Eólicos
 - c. De dendroenergía
 - d. Biogás
 - e. Minihidroeléctricos
 - f. Otros

En la etapa de diagnóstico la evaluación de la demanda de energía eléctrica se puede llevar a cabo en forma rápida y aproximada, valiéndose del criterio de algunos autores o entidades, así como de datos locales derivados de censos acerca del nivel de actividad. Además, es necesario echar mano de información local con respecto a las posibilidades de los diferentes recursos renovables o realizar estudios de campo para evaluar su disponibilidad.

En la mayoría de los casos se tratará de proyectos circunscriptos a una zona de pequeña extensión, por lo que se deberán efectuar reconocimientos in situ. Esto permitirá apreciar factores externos no detectados en un diagnóstico preliminar, así como ratificar o revisar la selección de posibilidades de aprovechamiento a partir de un examen directo de las condiciones de fundación en los sitios propuestos.

Resultará esencial realizar encuestas entre la población para conocer sus necesidades de energía y, en particular, para recabar información sobre el número de personas por vivienda, la cantidad de viviendas en la zona por servir y el tipo de actividades desarrolladas, así como en materia de ocupación económica, servicios, industria, comercio, educación, etc. En el caso de tener acceso a algún suministro eléctrico, se debe determinar la capacidad instalada, el número de horas de operación diaria, los picos máximos y mínimos, las tarifas, si existe una entidad que administra este servicio, la cantidad de empleados, etc. Además, se debe saber si los pobladores utilizan carbón, leña, velas y lámparas de combustible para uso doméstico para considerar su reemplazo con aparatos eléctricos convencionales.

El análisis in situ permitirá identificar los mejores lugares para la instalación de los sistemas de generación de energías renovables, teniendo en consideración la localización del recurso renovable y la demanda por satisfacer. Además, permitirá determinar las demandas máxima, media y mínima de energía eléctrica durante la ejecución del proyecto.

• Prefactibilidad

Con base en la información obtenida en la etapa de diagnóstico, en esta etapa se debe realizar un predimensionamiento de las obras del proyecto y estimar los costos de dichas obras y de los equipos electromecánicos requeridos. Será importante confirmar o modificar la implantación preliminar y la configuración del proyecto, así como estimar los costos con un mayor nivel de confiabilidad. En este tipo de instalaciones se debe efectuar una correcta estimación de la demanda en cuanto a la potencia y la energía, a fin de determinar el tamaño de la central de energías renovables por instalar.

La demanda de potencia, que representa la potencia instantánea que requieren varios aparatos eléctricos conectados simultáneamente al sistema, se expresa en vatios o kilovatios. En la demanda de energía la demanda de potencia se relaciona con el tiempo en que los aparatos eléctricos están conectados al sistema. La producción de energía eléctrica estará dada en vatios-hora o kilovatios-hora. Si la central eléctrica trabaja de forma *off-grid* y constituye la única fuente de energía eléctrica, el tamaño estará determinado por la demanda pico, es decir, por la mayor demanda de potencia esperada en el período durante el cual la instalación estará en servicio. Si se trata de centrales *on-grid*, el tamaño estará definido por el objetivo de la instalación conectada a una red y a una demanda determinadas.

En zonas rurales aisladas donde no hay acceso a la energía eléctrica o donde la fuente eléctrica es un grupo electrógeno diésel u otro similar, se debe definir la demanda de acuerdo no solo con los usos históricos de la energía eléctrica, sino también con los posibles usos según las nuevas actividades que se podrían desarrollar a partir del acceso a la energía eléctrica. Si se trata de instalaciones *off-grid*, cuando se utilicen fuentes de energía renovable intermitente (solar fotovoltaica o eólica) hay que considerar el almacenamiento para suministrar energía en los momentos del día en que no se cuenta con el recurso renovable o complementar la instalación con otra fuente renovable o convencional de energía ininterrumpida.

A fin de estimar la demanda se recomienda elaborar una curva, según el comportamiento de comunidades similares a las analizadas que presenten las mismas condiciones socioeconómicas y climáticas, un nivel de aislamiento parecido, etc.

Para elaborar la curva de demanda se debe:

- a. 1. Fijar un horizonte de planificación, al cabo del cual se dejará de satisfacer futuras demandas de energía (de un mínimo de 15 años y de un máximo de 25 años).
2. Definir el número de habitantes que se beneficiarán con el servicio futuro (fórmula de proyección lineal en función de la tasa de crecimiento anual).⁸
3. Con base en la información socioeconómica, las visitas in situ y las características de la zona de estudio, estimar la magnitud de cada uno de los sectores de demanda:

⁸ $P = P_a (1 + r)^n$, donde P es la población futura, P_a , la población actual, r, la tasa de crecimiento poblacional promedio anual y n, el número de años durante los cuales se prevé la demanda.

- a. La carga residencial. Se debe definir el tipo y el número de viviendas y edificios de acuerdo con un pronóstico de la población actual y futura, así como realizar un pronóstico de las potencias y de las horas diarias de encendido de las lámparas y los artefactos eléctricos de cada tipo de vivienda o edificio. Es importante efectuar una correcta estimación de la carga para evitar un escenario alto o bajo del consumo per cápita que muestre necesidades inexactas de potencia. Se requiere calcular la distribución en el tiempo de la carga residencial, sumando en cada instante las cargas de las lámparas y los artefactos encendidos.
- b. La carga para el alumbrado público. Es necesario estimar los puntos de alumbrado público, definiendo un punto para dos viviendas en los sitios donde la población se une. Se pueden considerar de 125 a 150 vatios por cada punto de alumbrado público y especificar las horas de encendido.
- c. La carga para uso comercial, industrial e institucional (escuelas y postas sanitarias, entre otros). Se debe determinar el tipo y el número de establecimientos comerciales, industriales e institucionales actuales y futuros, estimar las potencias y las horas diarias de encendido de los aparatos y las maquinarias requeridas por cada establecimiento comercial e industrial y calcular la distribución en el tiempo de la carga comercial e industrial, sumando en cada instante las cargas de los aparatos y las maquinarias encendidas.

La curva de demanda se presenta en un gráfico, en cuya abscisa se representan las horas del día y en cuya ordenada, la potencia en vatios o kilovatios. Las curvas de carga diaria están formadas por los picos obtenidos en intervalos de una hora en cada hora del día. La mayor carga pico define la demanda de potencia y el área bajo la curva representa la demanda de energía del día.

A partir de la curva de demanda se puede calcular la potencia media y el factor de carga.⁹

Cuanto mayor es el factor de carga, mejor es la distribución del consumo de energía durante el período considerado. La estimación de la demanda resulta fundamental para no sobreestimar o subestimar el dimensionamiento del proyecto. Si bien la sobreestimación implica incurrir en mayores costos de inversión, la subestimación de la demanda constituye un error más grave, que implica un déficit del servicio de energía que conlleva racionamientos de esta o el desabastecimiento del servicio.

Además de la demanda, se debe definir la potencia que requiere la instalación, proporcionada por la curva de demanda de donde se obtiene la carga pico. Esta demanda del sistema deberá ser comparada con la potencia firme de la instalación. En el caso de centrales de biocombustibles (p. ej., de biodiésel o biogás), el dimensionamiento de la central satisfará la demanda del sistema y la potencia firme será igual a la carga pico. Si se trata de recursos intermitentes (p. ej., eólico o solar), será necesario garantizar la potencia firme con el almacenamiento de energía mediante baterías o complementarla con otros recursos energéticos renovables o convencionales. También se podrá diseñar el sistema para su uso en determinadas horas del día, en función de la disponibilidad del recurso renovable; sin embargo, esto no es lo más recomendable.

• Diseño

En esta etapa se deben dimensionar las diferentes obras y los equipos electromecánicos de la central o instalación, con el fin de lograr su correcto funcionamiento para satisfacer la demanda requerida. El diseño debe responder a las exigencias en materia de resistencia, estabilidad, duración y explotación.

⁹ La potencia media (P_m) = $E/24$, donde P_m es la potencia en vatios o kilovatios y E , la energía en vatios hora o kilovatios hora. El factor de carga (F) = P_m/P_p , donde P_m es la potencia media y P_p , la potencia pico.

sobre las inversiones, a fin de obviar una etapa de factibilidad adicional, y para servir de base a la etapa de diseño. Realizar un estudio de factibilidad previo al diseño se justifica en proyectos que presentan situaciones dudosas en cuanto a sus características técnico-económicas y a la comparación de alternativas, siempre que la magnitud y la importancia de estos lo justifiquen.

