

# Energías renovables no convencionales en Chile: seguridad energética y defensa

María Luisa Saavedra Quintana<sup>1</sup>

## Resumen

Las acciones de mitigación del cambio climático, implican entre otras acciones, el desarrollo de los recursos energéticos renovables. Chile dispone de montos relevantes de recursos renovables que superan con creces la demanda del país, generando oportunidades de exportación. El país ha tenido un crecimiento acelerado de las energías renovables, lo que ha sido incentivado por políticas públicas. La disponibilidad de recursos renovables contribuye a la seguridad energética del país, aspecto relevante en un contexto global volátil de los mercados energéticos.

## Abstract

Mitigating climate change involves, among other actions, the development of renewable energy resources. Chile has significant amounts of renewable resources that far exceed the country's demand, creating export opportunities. The country has experienced rapid growth in renewable energies, which has been encouraged by public policies. The availability of renewable resources contributes to the country's energy security, a significant aspect in a volatile fossil fuels global markets context.

## 1. Las energías renovables en el mundo

Las energías renovables son un factor clave para cumplir con los objetivos de reducción de emisiones que se han impuesto los países, por lo que en el mundo se observa un desarrollo acelerado de estas tecnologías. A ello se agregan los efectos del conflicto Rusia-Ucrania que ha generado incrementos

<sup>1</sup> Ingeniero Civil Químico de la Universidad de Santiago de Chile (USACH). Diplomada en Logística de la Academia Politécnica Militar (ACAPOMIL) de Chile y Magister en Logística de IDE (Instituto de Directivos de Empresa) – CESEM de España. Actualmente es académica del Departamento de Ingeniería Química de la Universidad de Santiago de Chile.



### Palabras clave

Energías renovables  
Cambio climático  
Transición energética  
Carbono neutralidad

### Keywords

Renewable energy  
Climate change  
Energy transition  
Net zero emission



de precios y volatilidad de los combustibles: gas, petróleo y carbón, por lo que se ve a las energías renovables como un factor relevante para reducir la dependencia de combustibles fósiles importados.

En el año 2022, a nivel mundial, la generación de energía, baja en carbono, a partir de fuentes renovables; experimentó un aumento interanual del 5.7%, representando casi el 30% de la generación eléctrica. El aumento más significativo se dio en la región de Asia Pacífico representando más de la mitad de él, seguido por las Américas.<sup>2</sup> En el gráfico N° 1, se muestra la fase actual de participación de las energías solar y eólica, consideradas, energías renovables variables (VRE), en la matriz energética de los principales países del mundo que han construido dicho tipo de plantas. Entre ellos destaca Dinamarca, que ha alcanzado hasta un 65%, básicamente por la incorporación de plantas eólicas.

La Agencia Internacional de Energía, estima que, para el período 2023-2025, la generación de ener-

gía renovable crecerá a una tasa de más del 9%. Así, las energías renovables representarán sobre un tercio de la generación global de electricidad para el 2025.

En la figura N° 1, se presenta un conjunto de indicadores que muestran la situación reciente de las energías renovables en el mundo y los niveles que deberían alcanzar al año 2030, de forma que los países cumplan con sus metas de descarbonización para mitigar los efectos del cambio climático.

Se estima que, se requiere construir anualmente alrededor de 1.000 GW de energía renovable para lograr las metas de descarbonización propuestas. En 2022, se agregaron aproximadamente 300 GW de energías renovables a nivel mundial, lo que representa el 83% de la nueva capacidad de generación. Tanto el volumen como la proporción de energías renovables deben aumentar sustancialmente, lo que hoy es técnicamente factible y económicamente viable.

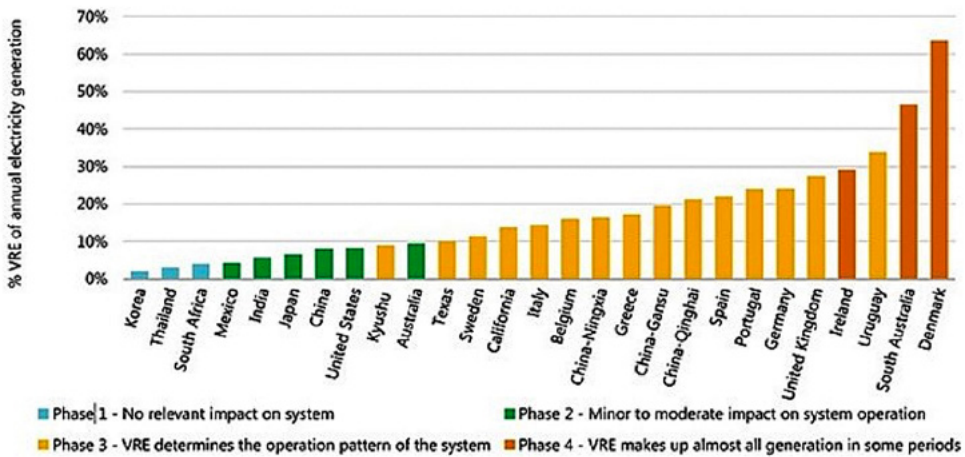


Gráfico N° 1. Participación actual de energía solar fotovoltaica y eólica en el mundo.

Fuente: International Energy Agency (IEA), Status of Power System Transformation 2019: Power System Flexibility.

2 IEA, Electricity Market Report, 2023.

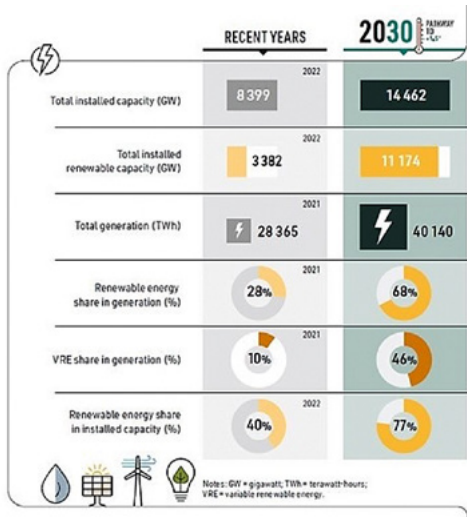


Figura N° 1. Indicadores claves para alcanzar metas mundiales de descarbonización al 2030.

Fuente: IRENA, Tripling renewable power and doubling energy efficiency by 2030 crucial steps towards 1.5°C, 2023.

## 2. Tecnologías de energías renovables no convencionales

El desarrollo de las tecnologías para la generación de energía a partir de fuentes renovables no convencionales (ERNC),<sup>3</sup> ha avanzado rápidamente en esta última década, reduciendo los costos de generación que han permitido hacer competitivo el desarrollo de proyectos de generación para la diversificación de la matriz energética nacional.

Las tecnologías con mayor desarrollo a la fecha son las fotovoltaicas y eólicas que, junto a reducir los costos de fabricación de celdas y aerogeneradores, se ha avanzado en el aumento de eficiencia en la generación de energía de las mismas.

El acelerado desarrollo de estas tecnologías ha permitido que actualmente en Chile ya estén operando plantas de ERNC, que se estimaba iban a ser desarrolladas a más largo plazo, como un ejemplo de este avance tecnológico acelerado es la Planta Cerro Dominador de 210 MW (Figura N° 2), perteneciente a EIG Global Energy Partners, que fue inaugurada en 2021 en el desierto de Atacama. Esta planta solar combina la generación fotovoltaica (PV)<sup>4</sup> y de concentración solar (CSP)<sup>5</sup> para garantizar la operación durante las 24 horas del día, entregando una solución a la mayor problemática que presentan las energías renovables fotovoltaicas, debido a que sus aportes no se mantienen en forma continua, sino que dependen de la radiación solar durante el día, y de las condiciones meteorológicas, como ausencia de nubosidad.

A continuación se entrega una breve explicación del funcionamiento de estas tecnologías, para comprender las ventajas y desventajas de cada una de ellas.



Figura N° 2. Planta de concentración solar (CSP) Cerro Dominador

Fuente: Disponible en: <https://generadoras.cl/prensa/un-dia-en-cerro-dominador-la-primer-planta-termosolar-de-latam>

- 3 Las energías renovables no convencionales (ERNC) son un tipo de energías obtenidas a partir de fuentes naturales que, a diferencia de las energías convencionales como petróleo, gas o carbón, no se consumen hasta agotamiento en escala humana, sino que se renuevan o reponen rápidamente. Ejemplos de estas fuentes son el agua en los ríos, la radiación solar y el viento.
- 4 PhotoVoltaic.
- 5 Concentrated Solar Power.



## 2.1. Tecnología de generación eólica

El uso de la energía eólica no es nuevo, si bien se usaba en la antigüedad (1750 a.C.) para generación de energía cinética que permitía recolectar agua o para hacer girar molinos de granos, su utilización para generación de energía eléctrica data de 1888, cuando Charles F. Brush, construye la primera turbina de 12 KW de potencia, en Ohio. Su empresa, Brush Electric se fusionó en 1992, con Edison General Electric Company creando General Electric Company (GE).

El desarrollo de turbinas eólicas no se masificó sino hasta la década de 1980 y ha venido en desarrollo hasta hoy, en que se dispone de turbinas de 16 MW de potencia con aspas, de alrededor de 123 metros de longitud que cubren un área de barrido de 50.000 metros cuadrados, como la turbina eólica *off-shore*, en el mar, instalada en junio 2023, en la costa de China por *Three Gorges Energy* y fabricada por Goldwind.<sup>6</sup>

La mayoría de las plantas eólicas existentes son construidas en tierra (*on-shore*), debido a que su construcción y mantenimiento es más fácil y tienen la ventaja de estar más cerca de las líneas de distribución para su conexión a la red eléctrica. La instalación de plantas eólicas *off-shore* tiene la ventaja de aprovechar mejor la velocidad del viento, al no existir obstáculos geográficos que alteren las corrientes, junto a la menor variabilidad de las mismas, permiten un mejor aprovechamiento y una captura de energía por más horas durante el día, lo que impacta en una mejor eficiencia.

Las turbinas eólicas que se operan actualmente pueden ser de eje vertical o eje horizontal, de

acuerdo a la disposición de su eje de rotación. Sin embargo, las turbinas de eje horizontal son las que han sido desarrolladas masivamente en el último tiempo, debido a que su diseño permite un mejor control de ángulo de inclinación de las aspas, permitiendo operar con velocidades de viento más elevadas y alcanzar mayor eficiencia en la generación de energía.

Las componentes de un generador eólico de eje horizontal (figura N° 3), son principalmente las palas o aspas, la góndola y la torre de soporte.

La góndola contiene los sistemas claves del aerogenerador, el rotor de giro de las aspas, el multiplicador o caja de engranajes que conecta el eje de baja velocidad acoplado a las aspas con el eje de alta velocidad, donde que multiplica hasta sobre 50 veces la rotación que permite el funcionamiento del generador eléctrico o turbina. Además, en la góndola se encuentra un mecanismo que permite cambiar el ángulo de las aspas o ángulo de ataque, un mecanismo de freno cuando la velocidad del viento excede el margen de seguridad de funcionamiento, un mecanismo de giro que permite mover el sistema para alinearlo con la dirección del viento y un sistema de control y protección.

La potencia extraída del viento depende del área de barrido de las aspas, de la velocidad y densidad del viento. La máxima potencia está determinada por la velocidad nominal de la turbina generadora.

Las turbinas eólicas pueden ser de velocidad fija o variable.

---

6 The State Council Information Office, Peoples Republic of China, [en línea], disponible en: [http://english.scio.gov.cn/chinavoices/2023-07/21/content\\_93561646.htm](http://english.scio.gov.cn/chinavoices/2023-07/21/content_93561646.htm)

Las turbinas de velocidad fija o Tipo 1, cuentan con un generador de inducción (o asíncrono) y un rotor aerodinámico que mueve un eje de baja velocidad, el que es conectado a otro eje de alta velocidad a través de un multiplicador; además de un torque proveniente del flujo de viento que se aplica al eje de baja velocidad.

En el caso de las turbinas de velocidad variable, existen tres tipos: Tipo 2 con generador de induc-

ción de rotor bobinado (Wound Rotor Induction Generator), Tipo 3 con generadores eléctricos doblemente alimentados (DFIG) y convertidor CA/CC/CA. Las turbinas Tipo 4, de paso regulado y convertidor CA/CC/CA. Las turbinas de velocidad variables han permitido mejorar la eficiencia y hacer un mejor uso del recurso eólico, su variabilidad permite una mejor acomodación a las diferentes normativas existentes para la conexión a redes eléctricas. Las más usadas son del tipo 3 y 4.

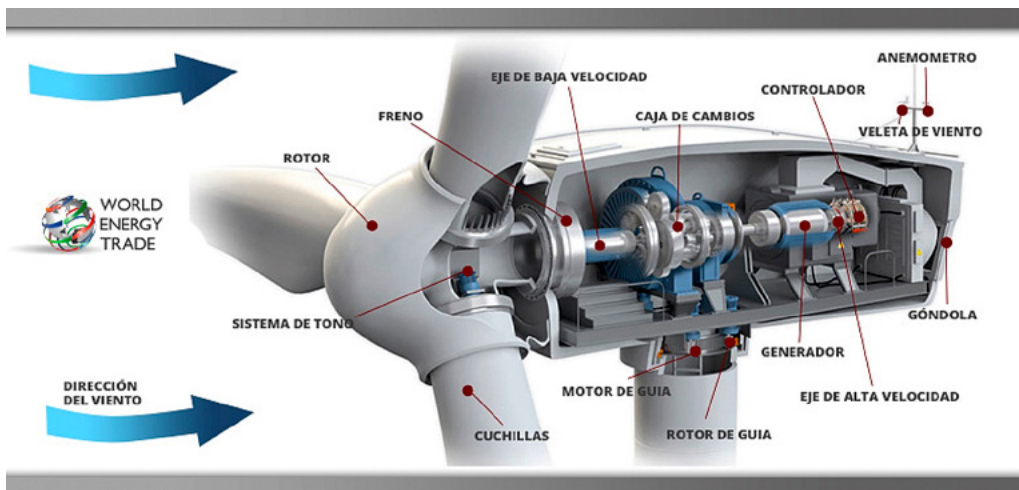


Figura N° 3. Componentes de la góndola de un aerogenerador típico.

**Fuente:** Disponible en: <https://www.worldenergytrade.com/energias-alternativas/energia-eolica/como-funcionan-los-aerogeneradores>

## 2.2. Tecnologías de generación fotovoltaica

El fenómeno fotovoltaico fue descubierto en 1883, por el físico alemán Charles Fritts, mediante delgadas capas de selenio dopadas con oro, que absorbían la luz solar y la convertían en electricidad, sin embargo, la eficiencia obtenida era muy baja, para su aplicación práctica.

No fue hasta la utilización de silicio, en 1954, por los científicos Gerald Pearson, Calvin Fuller y Daryl

Chapin, que trabajaban para Laboratorios Bell, fabricaron una placa de mayor eficiencia. El silicio es abundante en la naturaleza, por lo tanto, es el material más comúnmente usado en la actualidad para la fabricación de paneles fotovoltaicos. No obstante, existen otros materiales como arseniuro galio, telururo de cadmio o diseleniuro de cobre indio.

El fenómeno que ocurre en una placa solar fotovoltaica, es que la luz solar al incidir sobre un semiconductor, activa el desplazamiento de



electrones hacia un segundo semiconductor, generando una diferencia de potencial entre ambas placas.

En el caso del silicio, este cuenta con 14 electrones repartidos en diferentes capas, estando la última capa semivacía, al ser dopado con fósforo (P 5 electrones) se forma un semiconductor tipo “n”, al dopar otra capa con boro (B 3 electrones) se obtiene un semiconductor tipo “p”, formando huecos (diferencia de electrones) que actúan como cargas positivas. Una celda fotovoltaica se compone de una capa superior, semiconductor tipo “n” y una capa inferior, semiconductor tipo “p”. Al hacer incidir luz solar sobre la capa superior, los electrones de la capa “n” se difunden hacia los huecos de la capa “p”, dejando huecos en la capa “n”, de esta manera se genera una diferencia de potencial o voltaje entre ambas regiones (0,5 V para Si).

Actualmente, las tecnologías de generación se dividen entre la utilización de silicio cristalino (c-Si) o de silicio de capa delgada o película fina (PF). La mayoría de los paneles son a base de c-Si, dado que alcanzan mayores eficiencias, sin embargo, la tecnología de capa fina es más económica. La eficiencia de las celdas solares, se define como la relación entre la potencia eléctrica generada por unidad de área ( $W/m^2$ ) y la irradiación solar incidente sobre la superficie de la placa solar ( $1000 W/m^2$ ).

Las celdas c-Si pueden ser mono cristalinas (m-c-Si) o multi o policristalinas (m-c-Si). Las celdas de silicio monocristalino, son células formadas

por silicio intrínseco, son más caras y difíciles de conseguir. A pesar de eso, consiguen unos rendimientos promedios más altos sobre 18%, llegando a valores cercanos al 25% para mono cristalinos de alta pureza. Mientras que las celdas policristalinas, se construyen con silicio en mezcla con otros elementos, son más sencillas de conseguir y se logran rendimientos menores en promedio del orden de 15%, no superando 20%, para celdas tipo BS+PERC (back surface field+Passivated Emitter y Rear Cell).<sup>7</sup>

Las celdas de capa fina, PF, que en la actualidad se encuentran en el mercado, son de silicio amorfo (a-Si), cadmio-teluro (CdTe) y galio. Las celdas de capa fina son más baratas, menos duraderas y con rendimientos muy bajos de alrededor de un 6% a 13% que tienden a cero con el envejecimiento. Son las utilizadas principalmente para uso doméstico.

La potencia entregada por las celdas fotovoltaicas decrece con el uso debido a la degradación de materiales y al impacto de condiciones climáticas sobre la superficie de las celdas, no superando los 25 a 30 años de vida útil.

La generación de energía a partir de paneles fotovoltaicos requiere aparte del sistema de captación de energía compuesto por las celdas solares distribuidas en serie y/o en paralelo, se requiere de sistemas de acumulación de energía, de regulación, de conversión DC/AC<sup>8</sup> y adaptación al suministro eléctrico.

La planta solar fotovoltaica (PV) bolero, (figura

7 Disponible en: <https://www.sfe-solar.com/noticias/articulos/los-10-paneles-solares-mas-eficientes-del-mercado/#Mejores-tecnologias-y-eficiencia-de-Placas-Solares>.

8 Permite transformar la corriente continua (DC) a corriente alterna (AC).



Nº 4), ubicada en la comuna de Sierra Gorda, en el desierto de Atacama, Región de Atacama, es la planta operando en Chile, que tiene la mayor capacidad de generación instalada, 146 MW de

potencia, equivalente a suministrar energía eléctrica a 181.000 hogares.<sup>9</sup> Bolero fue comprada durante 2023, por AES Andes a la empresa EDF Renewables Chile.



Figura Nº 4: Planta solar fotovoltaica Bolero, Región de Atacama, Chile.

**Fuente:** Disponible en: <https://www.aesandes.com/es/aes-andes-adquiere-el-parque-bolero-solar-en-el-norte-de-chile>

### 2.3. Tecnología de concentración solar

Esta tecnología es totalmente diferente a la tecnología fotovoltaica, mientras que en esta última se convierte la energía lumínica del sol en energía eléctrica, en la de tecnología de concentración solar la energía térmica de la radiación solar, se concentra para calentar un fluido que luego será usado para producir vapor y generar energía eléctrica.

Actualmente existen tres tecnologías disponibles para la concentración solar de potencia, las que se diferencian en la forma de los colectores de radiación solar y en el tipo de fluido térmico usado. Estas son: i) torre central, ii) cilindro parabólico y iii) espejos reflectores Fresnel.

Los concentradores cilindros parabólicos, se componen de espejos en forma de canales parabólicos que reflejan la radiación solar directa concentrándola sobre un tubo absorbente por el que circula un fluido caloportador (agua, aceite, sales fundidas y otros). Para mejorar la eficiencia el colector debe poder modificar su posición durante el día para aprovechar mejor la radiación solar.

El fluido es conducido a un intercambiador de calor y sobrecalentado para accionar una planta eléctrica. Estos sistemas no poseen almacenamientos de energía por lo tanto operan solamente de día y pueden alcanzar temperaturas del orden de 450 °C.

Para suministrar electricidad en forma constante día y noche, las plantas de concentración con

<sup>9</sup> Disponible en: <https://energia.gob.cl/noticias/nacional/las-10-plantas-solares-mas-grandes-de-chile>.

cilindros parabólicos, operan en ciclo combinado con plantas térmicas convencionales a petróleo o gas.

Los reflectores Fresnel, son similares a los cilindros parabólicos, solo que usan colectores y reflectores lineales fijos que receptionan la luz solar reflejada desde heliostatos planos o semicurvo, alcanzando temperaturas superiores. Los heliostatos se encuentran alineados horizontalmente sobre un eje móvil, de tal manera que al moverse en dirección del sol reflejan la luz sobre el receptor ubicado unos metros arriba. El receptor conduce el fluido

caloportador, generalmente agua, que se requiere vaporizar para su uso en procesos industriales o generación de electricidad.

Los concentradores solares de disco parabólico, son platos o discos, con un receptor ubicado en la zona focal del disco. El disco posee un sistema de seguimiento de la luz solar para mejorar la eficiencia del sistema. La radiación colectada se refleja directamente sobre un motor, de ciclo tipo Stirling que convierte la energía calórica en electricidad o una microturbina que mueva un generador eléctrico.

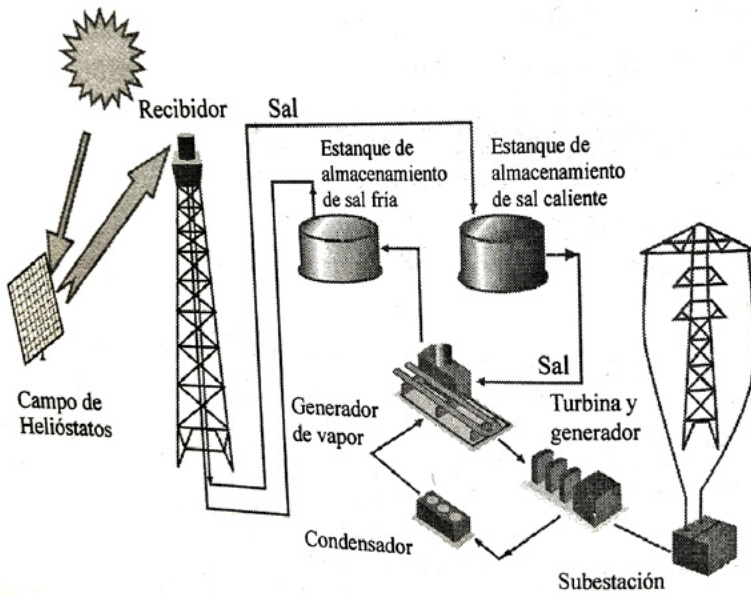


Figura N° 5. Planta de concentración solar de torre central.

Fuente: J.C. Vega de K., S. Ramírez M., 2014.

Una planta de concentración solar se compone de tres partes: una concentra la radiación solar a través de heliostatos (espejos móviles de alta reflectividad) que reflejan la luz solar y la direccionan a un punto ubicado en la parte superior de una

torre. La segunda parte del sistema lo compone el fluido, donde se concentra la energía térmica, que actualmente son sales fundidas (mezcla eutéctica<sup>10</sup> de nitrato de sodio y nitrato de potasio de bajo punto de fusión) que permiten almacenar

10 Mezcla eutéctica, es una mezcla de componentes diferentes que funden a una misma temperatura.





la energía por un período mayor de tiempo, 6 a 8 horas seguidas sin sol o bien enviarlas a un intercambiador de calor para generar vapor. La tercera parte de la central la compone la planta termoeléctrica donde el vapor generado mueve una turbina tal como ocurre en una central eléctrica a carbón, petróleo o gas.

## 2.4. Tecnología geotérmica

Es una tecnología que consiste en aprovechar el calor natural interno de la tierra, al encauzar esta energía hacia la superficie y utilizarla para fines doméstico, industrial o la operación de plantas termoeléctricas. La aplicación más común, de los recursos geotérmicos de alta temperatura, es encauzar el vapor que se genera en zonas volcánicas hacia plantas termoeléctricas. Existe también la utilización del calor interno de la Tierra para usos a baja temperatura (60-80 °C), como calefacción de edificios.

Existen tres tipos de plantas geotérmicas de alta temperatura, la primera utiliza el vapor seco colectado en los pozos perforados sobre los reservorios geotérmicos, directamente a la turbina de generación eléctrica. El vapor condensado, se almacena en un estanque de decantación para reinyectarlo al pozo, convirtiendo el fluido geotérmico en un recurso sostenible y renovable.

El segundo tipo son plantas que operan con mezclas de vapor y agua líquida a alta presión, que requieren ser separados en una cámara o flash, donde el fluido se despresuriza para llevarlo a la presión de diseño de la turbina, separando el vapor, el que es conducido a la turbina que activa el generador eléctrico, mientras que el agua líquida que queda en la cámara, que contiene alta concentración de sales, se enfría y se deposita en

estanques de decantación, para después juntarlo con el vapor enfriado, utilizado para mover la turbina y reinyectarlos en el pozo reservorio. Para mejorar la eficiencia, es posible utilizar un proceso de doble flash, donde el líquido que se extrae al primer flash se lleva a un segundo proceso de separación a menor presión ya así alimentar una turbina de baja presión.

El tercer tipo son plantas de ciclo combinado, la mezcla vapor agua líquida extraída del reservorio se utiliza para calentar y evaporar, en un sistema cerrado indirecto, un fluido de trabajo que se conduce a una turbina generadora de electricidad. Este fluido de trabajo a evaporar puede ser un hidrocarburo de bajo punto de ebullición como propano, n-butano, isobutano u otro similar. Este fluido, posterior al paso por la turbina se condensa y se redirecciona, nuevamente hacia el intercambiador-evaporador. Al igual que en los procesos anteriores, el fluido geotérmico se decanta y se reinyecta en los pozos reservorios.

Existe otro tipo de tecnología geotérmica, conocido como "rocas calientes secas", que aún no ha sido altamente explotada, pretenden perforar las rocas calientes y extraer energía térmica de reservorios rocosos con alto contenido energético, pero con poca o nula presencia de agua. A través de perforar la roca caliente seca, es posible inyectar agua para generar vapor y su posterior uso.

## 3. Recursos de energías renovables en Chile

El país dispone de recursos naturales que permiten viabilizar el desarrollo de las energías renovables, destacando entre ellos la disponibilidad de radiación solar, además de recurso eólico, hidroeléctrico, geotérmico y biomasa.



### 3.1. Radiación solar

Chile es conocido por la existencia de una gran disponibilidad de recursos solares, debido a su ubicación geográfica y a las condiciones climáticas que posee. El país se extiende a lo largo de una gran parte de América del Sur y cuenta con una amplia variedad de climas, desde desiertos áridos en el norte hasta regiones más húmedas en el sur. Esta diversidad climática le brinda a Chile la ventaja de tener una gran disponibilidad de recursos solares en la mayoría de sus regiones.

En general, en el norte, en particular el desierto de Atacama, es reconocido como uno de los lugares con mayor radiación solar en el mundo. Las bajas precipitaciones que ocurren durante el año, junto a la escasa presencia de nubes, convierten a la Región de Atacama en una zona con alto potencial para el desarrollo de proyectos de

generación mediante energía solar.

Chile, a partir de la instalación a nivel industrial de la primera planta solar fotovoltaica en 2012, ha aprovechado esta abundante disponibilidad de recursos solares, para expandir su capacidad de generación de energía, estimándose que al año 2025 alcanzaría 13.500 MW de capacidad instalada en centrales solares fotovoltaicas.<sup>11</sup>

En la tabla N° 1, se presenta el potencial que se ha estimado posee el país, según la región, para la generación de energía mediante tecnología fotovoltaica considerando plantas fijas o con seguimiento solar. El total estimado de potencial disponible, para ambos tipos de configuraciones de proyectos FV,<sup>12</sup> sería superior al millón de MW de capacidad instalable, aunque, como era esperable, se encontraría concentrado en las regiones del Norte Grande.

| Región                       | Arreglo fijo     |                  | Arreglo con seguimiento |                  |
|------------------------------|------------------|------------------|-------------------------|------------------|
|                              | Superficie (ha)  | Capacidad (MW)   | Superficie (ha)         | Capacidad (MW)   |
| De Arica y Parinacota        | 104.015          | 20.803           | 205.024                 | 41.005           |
| De Tarapacá                  | 309.163          | 61.833           | 1.055.670               | 211.134          |
| De Antofagasta               | 4.995.313        | 999.063          | 6.003.064               | 1.200.613        |
| De Atacama                   | 769.467          | 153.893          | 920.363                 | 184.073          |
| De Coquimbo                  | 11.442           | 2.288            | 16.201                  | 3.240            |
| De Valparaíso                | 117              | 23               | 319                     | 64               |
| Metropolitana de Santiago    |                  |                  |                         |                  |
| Del L. G. Bernardo O'Higgins |                  |                  |                         |                  |
| Del Maule                    |                  |                  |                         |                  |
| Del Biobío                   |                  |                  |                         |                  |
| De la Araucanía              |                  |                  |                         |                  |
| De Los Ríos                  |                  |                  |                         |                  |
| De Los Lagos                 |                  |                  |                         |                  |
| <b>Total</b>                 | <b>6.189.517</b> | <b>1.237.903</b> | <b>8.200.641</b>        | <b>1.640.128</b> |

Tabla N° 1. Potencial solar fotovoltaico en Chile.

**Fuente:** Ministerio de Energía y GIZ, Energías renovables en Chile, el potencial eólico, solar en hidroeléctrico de Arica a Chiloé, 2014.

11 Coordinador Eléctrico Nacional, [www.coordinador.cl](http://www.coordinador.cl)

12 Planta de generación fotovoltaica.



| Región                       | Superficie (ha)  | Capacidad (MW) |
|------------------------------|------------------|----------------|
| De Arica y Parinacota        | 25.242           | 6.311          |
| De Tarapacá                  | 544.339          | 136.085        |
| De Antofagasta               | 1.579.472        | 394.868        |
| De Atacama                   | 62.427           | 15.607         |
| De Coquimbo                  |                  |                |
| De Valparaíso                |                  |                |
| Metropolitana de Santiago    |                  |                |
| Del L. G. Bernardo O'Higgins |                  |                |
| Del Maule                    |                  |                |
| Del Biobío                   |                  |                |
| De la Araucanía              |                  |                |
| De Los Ríos                  |                  |                |
| De Los Lagos                 |                  |                |
| <b>Total</b>                 | <b>2.211.480</b> | <b>552.871</b> |

Tabla Nº 2. Potencial de la tecnología concentración solar de potencia (CSP) en Chile.

**Fuente:** Ministerio de Energía y GIZ, Energías renovables en Chile, el potencial eólico, solar en hidroeléctrico de Arica a Chiloé, 2014.

En la tabla Nº 2, se presenta información referente al potencial que posee Chile por región, para desarrollar centrales de tecnología de concentración solar CSP,<sup>13</sup> considerando un factor de planta mayor a 0,5, es decir, se genera en promedio solo un 50% de la capacidad máxima instalada, y uso de suelo de un mínimo de 200 hectáreas. El

potencial disponible sería superior a 500.000 MW de capacidad instalada, estando concentrado en las regiones de Tarapacá y de Antofagasta.

En términos de potencia media, la potencia solar fotovoltaica es 492.000 MW, lo que supera con creces la demanda media del año 2023 del país que alcanza a 10.500 MW, pudiendo abastecer el crecimiento futuro por muchos años e incluso pudiendo exportar energía eléctrica. Lo mismo ocurre con la potencia solar para la tecnología CSP, cuyo potencial es de 552.000 MW.

### 3.2. Recurso eólico

Chile cuenta con recursos eólicos que permiten viabilizar el desarrollo de centrales generadoras que utilizan esta tecnología en gran parte del territorio nacional. Este recurso presenta variaciones importantes favorables en algunas regiones del país, siendo particularmente propicias, para la generación de energía eólica, las zonas de Taltal, Biobío y Chiloé, debido a las condiciones climáticas y geográficas. (tabla Nº 3).

| Región o zona               | Cartera de proyectos |                  | Potencial disponible |                  | Potencial total |                  |
|-----------------------------|----------------------|------------------|----------------------|------------------|-----------------|------------------|
|                             | Capacidad (MW)       | Factor de planta | Capacidad (MW)       | Factor de planta | Capacidad (MW)  | Factor de planta |
| De Antofagasta (sin Taltal) | 240                  | 0,37             | 2.622                | 0,32             | 2.862           | 0,32             |
| Taltal                      | 99                   | 0,41             | 11.479               | 0,36             | 11.578          | 0,36             |
| De Atacama                  | 533                  | 0,34             | 86                   | 0,34             | 619             | 0,34             |
| De Coquimbo                 | 777                  | 0,35             | 389                  | 0,36             | 1.166           | 0,36             |
| De Valparaíso               | 21                   | 0,40             |                      |                  | 21              | 0,40             |
| Del L. B. O'Higgins         |                      |                  | 75                   | 0,34             | 75              | 0,34             |
| Del Biobío                  | 419                  | 0,32             | 4.581                | 0,33             | 5.000           | 0,33             |
| De La Araucanía             | 407                  | 0,38             | 1.933                | 0,33             | 2.341           | 0,34             |
| De Los Ríos                 | 51                   | 0,39             | 2.863                | 0,35             | 2.914           | 0,35             |
| De Los Lagos (sin Chiloé)   |                      |                  | 3.770                | 0,36             | 3.770           | 0,36             |
| Isia Grande de Chiloé       | 428                  | 0,39             | 9.678                | 0,34             | 10.106          | 0,34             |
| <b>Total</b>                | <b>2.975</b>         | <b>0,36</b>      | <b>37.477</b>        | <b>0,34</b>      | <b>40.452</b>   | <b>0,35</b>      |

Tabla Nº 3. Potencial de la tecnología eólica en Chile.

**Fuente:** Ministerio de Energía y GIZ, Energías renovables en Chile, el potencial eólico, solar en hidroeléctrico de Arica a Chiloé, 2014.

13 Concentración Solar de Potencia.



El potencial eólico promedio es de aproximadamente 14.160 MW, lo que se compara favorablemente con la demanda actual del país que alcanza a aproximadamente 10.500 MW.

### 3.3. Recurso hidroeléctrico

El país cuenta con una variedad de ríos y cuerpos de agua que pueden utilizarse para la generación de energía hidroeléctrica. El desarrollo de esta tecnología de generación data de fines del siglo XIX

con la central Chivilingo, siendo posteriormente a partir de 1940 con la creación de ENDESA desarrollada ampliamente. La diversidad geográfica del país brinda la oportunidad de desarrollar proyectos hidroeléctricos en las regiones del país que presentan un potencial para proyectos hidroeléctricos. La topografía montañosa y la abundancia de ríos y arroyos ofrecen oportunidades para la construcción de estas centrales (ver detalle por zona geográfica en tabla N° 4 y en mapa de la figura N° 6)

| Cuenca                           | Centrales (N°) | Capacidad (MW)  | P. Media (MW)  | f.p.        |
|----------------------------------|----------------|-----------------|----------------|-------------|
| Río Aconcagua                    | 9              | 104,3           | 78,3           | 0,75        |
| Río Maipo                        | 30             | 856,0           | 554,1          | 0,65        |
| Río Rapel                        | 31             | 699,2           | 422,8          | 0,60        |
| Río Mataquito                    | 45             | 727,3           | 410,5          | 0,56        |
| Costeras Mataquito-Maule         | 1              | 1,1             | 0,7            | 0,64        |
| Río Maule                        | 85             | 1408,0          | 758,0          | 0,54        |
| Costeras Maule-límite regional   | 1              | 1,2             | 0,6            | 0,50        |
| Río Itata                        | 66             | 767,6           | 445,4          | 0,58        |
| Río Biobío                       | 191            | 2687,4          | 1713,2         | 0,64        |
| Costeras Biobío-Carampangue      | 1              | 2,4             | 1,2            | 0,51        |
| Río Carampangue                  | 12             | 55,7            | 33,0           | 0,59        |
| Río Lebu                         | 7              | 40,7            | 22,3           | 0,55        |
| Costeras Lebu-Paicavi            | 5              | 40,1            | 25,6           | 0,64        |
| Costeras Paicavi-límite regional | 4              | 34,2            | 17,8           | 0,52        |
| Río Imperial                     | 95             | 455,8           | 287,8          | 0,63        |
| Río Toltén                       | 144            | 884,9           | 602,1          | 0,68        |
| Río Queule                       | 2              | 1,5             | 1,0            | 0,64        |
| Río Valdivia                     | 65             | 1370,5          | 885,1          | 0,65        |
| Río Bueno                        | 179            | 1358,6          | 943,8          | 0,69        |
| Cuencas entre Bueno y Puelo      | 57             | 101,1           | 66,6           | 0,66        |
| Río Puelo                        | 21             | 811,9           | 503,4          | 0,62        |
| Islas Chiloé y circundantes      | 29             | 62,7            | 41,1           | 0,66        |
| <b>Total general</b>             | <b>1.080</b>   | <b>12.472,0</b> | <b>7.815,0</b> | <b>0,63</b> |

Tabla N° 4. Potencial de la tecnología hidroeléctrica en Chile.

**Fuente:** Ministerio de Energía y GIZ, Energías renovables en Chile, el potencial eólico, solar en hidroeléctrico de Arica a Chiloé, 2014.

La cuenca del río Biobío presentaría el mayor potencial disponible (2.687 MW, 21,5% del total), cuya concreción permitiría duplicar la capacidad que estaba operativa en esa cuenca a fines del

año 2012 (2.488 MW). El potencial estimado para la Zona Central del país, sin considerar la cuenca del Biobío, alcanzaría a más de 4.500 MW (36,6% del total), en una zona donde se

concentra parte importante de la demanda eléctrica.<sup>14</sup>

Por su parte, el potencial disponible en la Zona Sur del país, sin considerar la cuenca del río Biobío, equivale al 41,9% del total identificado, distribuidos en forma bastante homogénea entre las principales cuencas de la zona.

El factor de planta<sup>15</sup> estimado por la modelación fluctúa entre 54% y 68% para las cuencas de mayor potencial, con valores más altos en la Zona Sur.

Con el potencial hidroeléctrico del país, que totaliza 12.472 MW de potencia instalada y una potencia media de 7.815 MW, se podría satisfacer aproximadamente el 75% de la demanda del país del año 2023.

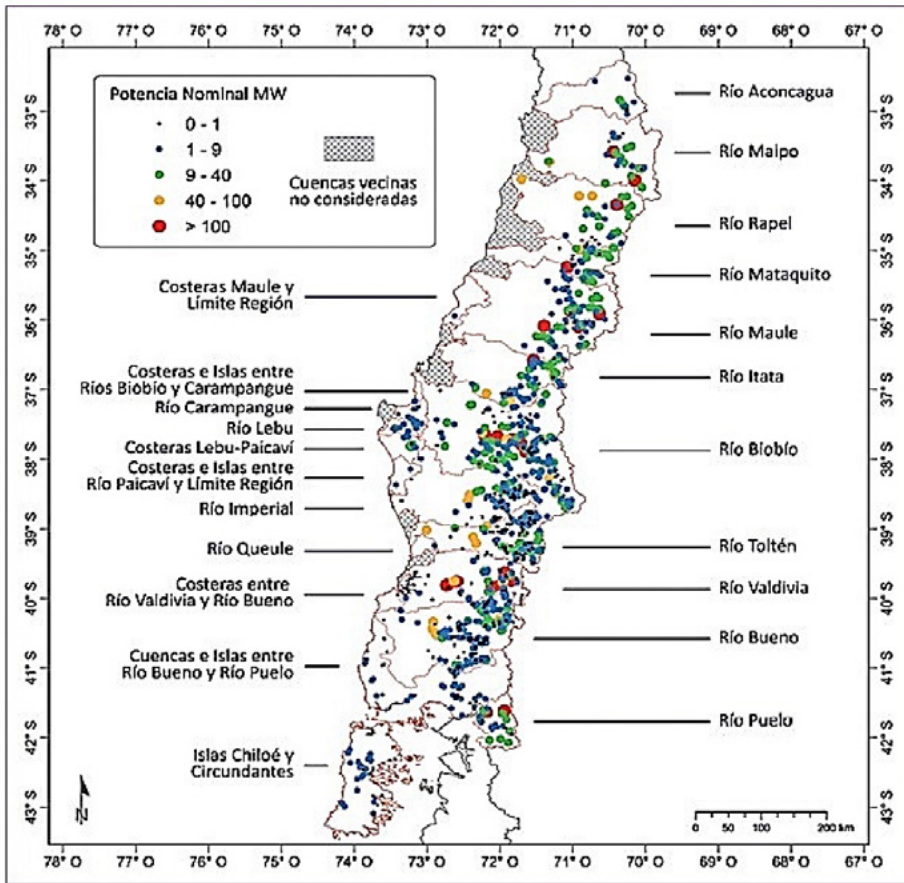


Figura Nº 6. Distribución geográfica del potencial hidroeléctrico en Chile.

**Fuente:** Ministerio de Energía y GIZ, Energías renovables en Chile, el potencial eólico, solar en hidroeléctrico de Arica a Chiloé, 2014

14 Las cifras indicadas en el apartado 3,3 han sido obtenidas de Ministerio de Energía y GIZ, Energías renovables en Chile, el potencial eólico, solar en hidroeléctrico de Arica a Chiloé, 2014.

15 Factor de planta corresponde al porcentaje del tiempo que una central generadora puede operar a máxima capacidad.

### 3.4. Recurso geotérmico

El país tiene un alto potencial geotérmico debido a su ubicación en el Cinturón de Fuego del Pacífico y a su geología caracterizada por la presencia de volcanes y actividad geotérmica manifiesta, como es el caso de fuentes termales y zonas con presencia de géiseres.

Según el estudio realizado por la Mesa de la geotermia en el año 2018, se identificó que el

rango medio del potencial geotérmico desarrollable en Chile al año 2050 es de alrededor de 2.100 MW, lo que representa aproximadamente un 20% de la demanda eléctrica del país al año 2023.

En el mapa de la figura N° 7 se indican los puntos geográficos con potencial para el desarrollo de proyectos geotérmicos en Chile.

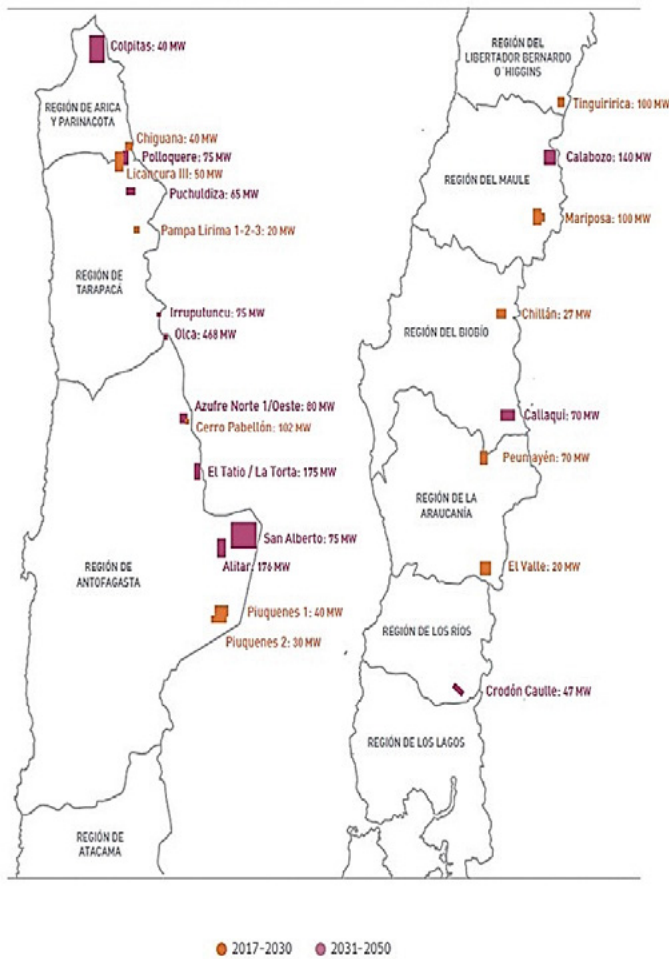


Figura N° 7. Distribución geográfica del potencial geotérmico.

Fuente: Centro de Energía Universidad de Chile, ESMAP y Fundación Chile, Mesa de geotermia, rol de la geotermia en el desarrollo de la matriz eléctrica chilena, julio 2018.



## 4. Desarrollo actual de las energías renovables

### 4.1. Situación en Chile

El desarrollo acelerado de las energías renovables en Chile ha sido el resultado de las políticas públicas implementadas por el Estado y el desarrollo tecnológico de los fabricantes de equipos, que han hecho posible su desarrollo.

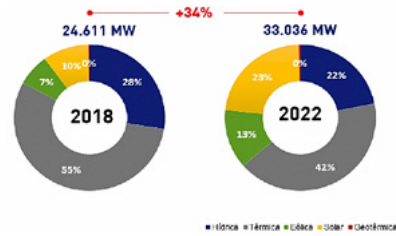


Gráfico N° 2. Evolución de la capacidad instalada en SEN entre 2018 y 2022, según tecnología.

**Fuente:** Coordinador Eléctrico nacional, [en línea], disponible en: [www.coordinador.cl](http://www.coordinador.cl)

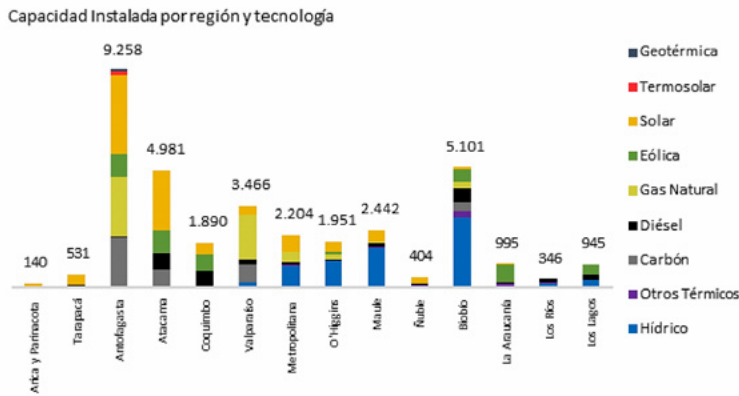


Gráfico N° 3. Capacidad instalada en SEN a 2023 según tecnología por región.

**Fuente:** Coordinador Eléctrico Nacional, disponible en: [www.coordinador.cl](http://www.coordinador.cl)

La potencia instalada de las ERNC entre el año 2018 y 2022, ha pasado de 4.184 MW a 15.197 MW, es decir ha alcanzado un crecimiento de un 363%.

eólica, que han aumentado drásticamente pasando en conjunto de un 0,5% en 2011 a un 38,0% en 2022 de la energía generada.

Esta tendencia de crecimiento de las energías renovables en la matriz energética nacional se ha mantenido, llegando incluso a tener una participación de 55,6% de la energía generada en el año 2022, incluyendo las fuentes ERNC y renovables convencionales.<sup>16</sup> El mayor aumento lo han tenido las tecnologías solar fotovoltaicas y

Al 30 de septiembre de 2023, el Sistema Eléctrico Nacional (SEN) posee 34.653,0 MW de capacidad instalada para generar energía eléctrica, de los cuales 15.521,2 MW corresponden a centrales de energía renovable no convencional. En el Gráfico N° 2, se muestra el detalle de esta capacidad instalada según tecnología, mientras que en

16 Por energía convencional se entiende las generadas tradicionalmente como carbón, petróleo, hidroelectricidad, este último al usar un recurso renovable se denomina energía renovable convencional cuando supera 40 MW de potencia instalada, bajo este nivel se considera ERNC.



el gráfico N° 3, se aprecia la localización de las diferentes tecnologías, en cada región del país.

Para el año 2023 la tendencia del desarrollo de energías renovables continua con intensidad, se encuentran en construcción 4.060 MW, de los cuales 3.416 MW son centrales solares fotovoltaicas, 366 MW centrales eólicas y 205 MW en centrales hidroeléctricas.<sup>17</sup>

### 4.2. Situación Latinoamérica y el Caribe

Las cifras de OLADE<sup>18</sup> respecto de la participación de energías renovables en Latinoamérica y el Caribe muestran una gran diversidad, tal como se aprecia en el gráfico N° 4, destaca un grupo importante

de países cuya capacidad renovable supera el 50%, en que la tecnología dominante en la región es la hidroelectricidad, alcanzando un 46,2% de la generación del año 2020 (ver Gráfico N° 5).

El ritmo de crecimiento de la generación renovable en 2020 solo agregó 11.600 MW de generación renovable (54,2% solares, 31,5% eólicos, 10,5% biomasa y 3,3% hidráulico), lo que equivale a un crecimiento de solo 7% de la capacidad instalada renovable de toda la región, siendo un tercio del crecimiento de la capacidad renovable a nivel global. Dado que la región cuenta con una alta capacidad de generación hidráulica, el desarrollo de energía eólica y solar fotovoltaica no sigue la misma tendencia que en el resto del mundo.<sup>19</sup>

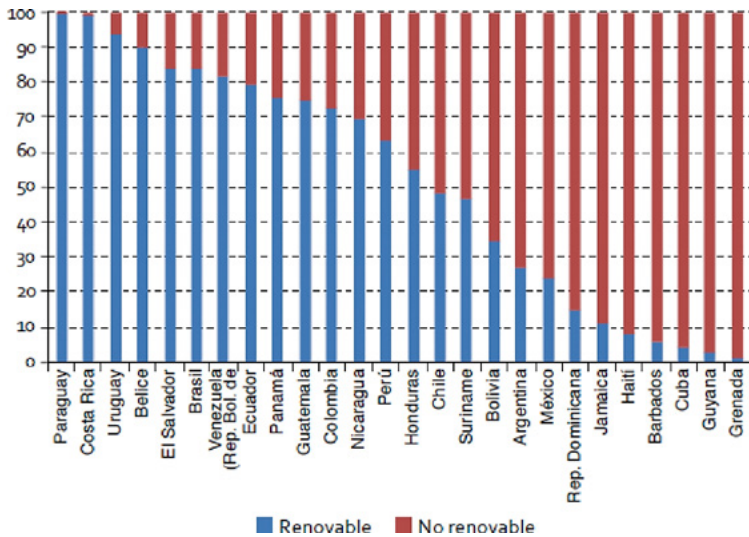


Gráfico N° 4. Proporción de energía renovable y no renovable de la generación eléctrica en países de América Latina y el Caribe, 2020.

Fuente: CEPAL y OLADE, 2022<sup>20</sup>

17 Datos obtenidos de Coordinador Eléctrico Nacional, [en línea], disponible: [www.coordinador.cl](http://www.coordinador.cl)  
 18 Organización Latinoamericana de Energía, [en línea], disponible en: [www.olade.org](http://www.olade.org)  
 19 Disponible en: [https://www.olade.org/wp-content/uploads/2023/03/Estrategia-para-una-America-Latina-y-el-Caibe-mas-renovable\\_VF.pdf](https://www.olade.org/wp-content/uploads/2023/03/Estrategia-para-una-America-Latina-y-el-Caibe-mas-renovable_VF.pdf)  
 20 Disponible en: [https://www.cepal.org/sites/default/files/events/files/transicion\\_energetica\\_ponencia\\_universidad\\_ecuador.pdf](https://www.cepal.org/sites/default/files/events/files/transicion_energetica_ponencia_universidad_ecuador.pdf)





En la región, OLADE ha identificado barreras al desarrollo de las energías renovables, mencionando las siguientes:

- Redes de transmisión insuficientes. Las redes eléctricas existentes fueron diseñadas en base al tradicional sistema hidrotérmico dominante en la región. La revisión del diseño de la red se plantea en un contexto en el cual existe un retraso de inversiones en sus redes de transmisión de alta y media tensión.
- La regulación existente fue prevista para otro modelo de expansión de redes. En muchos países no favorece el desarrollo de una red eléctrica adaptada a la introducción de generación distribuida y la ausencia de una planificación conjunta de generación y de redes con la flexibilidad requerida para incorporar una alta penetración de energías renovables.
- Largas distancias entre el recurso energético y el consumo. En varios países de la región existe una distancia significativa y falta de capacidad de transmisión eléctrica entre las regiones donde se concentra la demanda y aquellas en las que se encuentran los mejores recursos energéticos, este problema lo tienen especialmente Argentina, Colombia y Chile.
- Largos plazos para la ampliación de la red de transmisión. Los plazos para la construcción de nuevas líneas eléctricas resultan mayores a los tiempos requeridos para desarrollar y construir parques eólicos o solares.
- Problemas en otorgar autorizaciones para nuevas líneas de transmisión. Las limitaciones para la construcción de nuevas líneas eléctricas como la determinación de su trazado, la obtención de servidumbres, el otorgamiento de autorizaciones ambientales y las licencias sociales, son cada vez más complejas.
- Contexto sistémico que desfavorece las energías renovables. En algunos países, la estructura normativa e institucional, los modelos de planificación, los principios de funcionamiento y las capacidades de los actores públicos y privados del sector energético fueron diseñados para un modelo energético que favorece la continuidad del modelo actual y que penaliza de manera indirecta, o a veces incluso directa, el avance de generación renovable como la eólica o solar.
- Subsidios a otras fuentes de generación. En algunos países, particularmente en aquellos productores de gas natural, existen subsidios indirectos a los combustibles fósiles. Esto altera el mercado pudiendo limitar la introducción de energías renovables como la eólica o solar.
- Falta de reconocimiento de los servicios complementarios<sup>21</sup> requeridos para operar el sistema eléctrico. La normativa en algunos países incluye servicios complementarios con un enfoque diferente al requerido para la operación de un sistema con alto porcentaje de energía renovable variable.
- Falta de flexibilidad de los sistemas eléctricos. Es necesario introducir flexibilidades para la planificación y la operación de sistemas eléctricos con alta participación de energías renovables variables que aporte a la confiabilidad. Las regulaciones suelen tener rigideces que dificultan la operación de un sistema con

21 Los servicios complementarios en redes eléctricas se refieren a una serie de funciones y actividades que son necesarias para garantizar la operación segura y confiable del sistema eléctrico. Estos servicios son esenciales para mantener el equilibrio entre la oferta y la demanda de energía eléctrica en tiempo real y para mantener la calidad y la estabilidad de la electricidad suministrada a los consumidores. Algunos de los servicios complementarios más comunes incluyen: control de frecuencia y voltaje y recuperación del servicio ante fallas.

alta participación de energías renovables variables.

- Dificultades en los modelos de tarificación eléctrica. Un sistema con altos niveles de participación de energías renovables requiere un nuevo modelo de tarificación para el mercado mayorista y la remuneración de los servicios complementarios requeridos para su correcto funcionamiento en condiciones de seguridad y calidad de servicio, lo que no sucede en algunos países de la región.
- Dificultad para el cambio de paradigma de la operación del sistema. Un sistema energético basado en una alta participación de fuentes renovables variables requiere una operación

sustancialmente diferente a la del modelo tradicional, siendo necesario redefinir las estrategias de planificación y operación de las redes interconectadas.

- Falta de herramientas tecnológicas para los operadores. La mayoría de los operadores de los sistemas eléctricos de la región no cuenta con la experiencia y las herramientas requeridas para planificar y operar un sistema en el que deban integrarse una alta proporción de fuentes renovables variables.

Para acelerar la incorporación de energías renovables se requiere abordar las temáticas señaladas previamente.

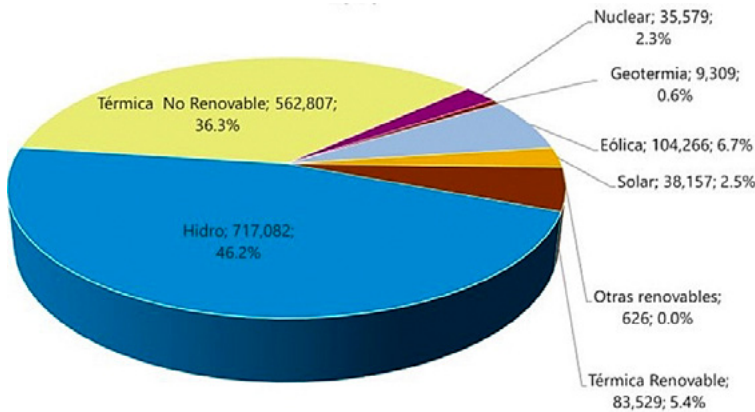


Gráfico N° 5. Generación eléctrica por tipo de fuente en América Latina y el Caribe, 2020.

Fuente: OLADE Energy Outlook 2021, disponible en: [www.olade.org](http://www.olade.org)

## 5. Normativa y política energética nacional

### 5.3. Normativa de energías renovables

Chile ha sido pionero en la desregulación de su industria eléctrica para incorporar principios competitivos y de mercado libre, con la reforma realizada en el año 1982, contenida en DFL N° 1, se convirtió en el primer país en América Latina

y uno de los primeros en el mundo en crear mercados eléctricos desregulados.

Esta normativa hizo viable el desarrollo y la operación del sistema eléctrico permitiendo el ingreso de empresas privadas, bajo la regulación y supervisión de instituciones públicas.

Actualmente, todo el sistema eléctrico, integrado por los sectores de generación, transmisión y



distribución, son operados por empresas privadas nacionales e internacionales, incluyendo a principales empresas que operan a nivel mundial en la industria de la energía.

En general, la política energética se basa en un modelo competitivo para la generación de energía y la comercialización al por mayor, mientras que la transmisión y distribución de energía son monopolios regulados con procesos de fijación de tarifas basados en un retorno objetivo de activos establecido por ley, según un modelo teórico eficiente.

En la figura N° 8, se presenta una línea de tiempo con los hitos más importantes del proceso de evolución normativa del sistema eléctrico nacional a partir de 1982.

En materia de energía renovable, el organismo regulador ha efectuado desde el año 2004, modificaciones a la normativa para incorporar incentivos al desarrollo de las energías renovables en el país, siendo las más relevantes las que se indican a continuación:

- Ley 19.940 o Ley Corta I. Define el concepto de medios de generación renovable de fuente no convencional o ERNC,<sup>22</sup> calificando como tales a las fuentes renovables geotérmica, eólica, solar, biomasa, mareomotriz, pequeñas centrales hidroeléctricas hasta una potencia de 40 MW, plantas de cogeneración<sup>23</sup> y otras similares. Además, exceptúa a las centrales ERNC del pago total de peajes por el uso del sistema de transmisión troncal.<sup>24</sup>
- Ley 20.018 o Ley Corta II. Establece que, en las licitaciones de suministro eléctrico para empresas distribuidoras, los propietarios de medios de generación ERNC tienen el derecho a suministrarlas, al precio promedio de sus contratos hasta el 5% del total de demanda destinada a clientes regulados. Este es un mecanismo para garantizar ingresos a las centrales ERNC y con ello viabilizar su financiamiento.
- Ley 20.257. Establece la obligación para las empresas eléctricas que efectúan ventas a clientes finales de que un 10% de la energía comercializada provenga de centrales generadoras ERNC en forma escalonada a partir del año 2010. De esta manera, incentiva el desarrollo de las centrales ERNC.
- Ley 20.698. Permite la ampliación de la matriz energética mediante fuentes renovables no convencionales incrementando la obligación de las empresas generadoras a acreditar el porcentaje de ERNC destinado al suministro de sus ventas a usuarios finales sea de 20%.
- Ley 20.780. Crea el llamado Impuesto Verde, consistente en un impuesto anual que grava las emisiones al aire de material particulado (MP), óxido de nitrógeno (NOx), dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), producidas por fuentes fijas, consistentes en calderas o turbinas, que en conjunto sumen una potencia instalada mayor o igual a 50 [MWt]. El primer pago del impuesto ocurrió en abril de 2018, recaudando 191,3 Millones de USD. De esta manera hace más costoso la generación de fuentes fósiles y con ello genera un incentivo a la generación renovable.

<sup>22</sup> Energía renovable no convencional.

<sup>23</sup> Una planta de cogeneración entrega electricidad y calor a procesos industriales.

<sup>24</sup> El sistema troncal corresponde a las líneas de transmisión de más alta tensión, usualmente sobre 220 kV.

- Ley 20.805. Perfecciona el sistema de licitaciones de suministro eléctrico para clientes sujetos a regulaciones de precios, incorporando incentivos a las ERNC.
- Ley 21.210 del año 2020. Moderniza la legislación tributaria, disponiendo que aquellas fuentes emisoras podrán compensar todo o parte de sus emisiones gravadas, para efectos de determinar el monto del impuesto a pagar, mediante la implementación de proyectos de reducción de emisiones. De esta manera se crea un nuevo incentivo a las energías renovables.
- Ley 20.936 de 2016. Establece un nuevo esquema de expansión de la red de transmisión y asigna el pago del 100% de la red a la demanda. De esta manera, exime totalmente del pago de la red de transmisión a los generadores.

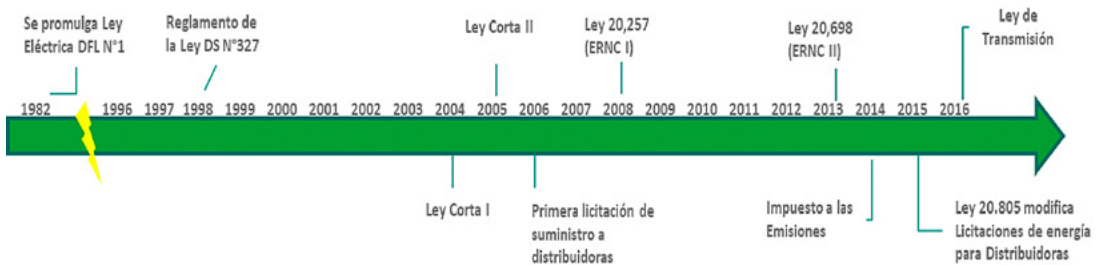


Figura N° 8. Hitos relevantes en la normativa eléctrica para energías renovables.

Fuente: Elaboración de la autora.

## 5.4. Política energética 2050

En el año 2015, el país emitió su primera Política Energética Nacional, la que establece una visión de largo plazo para el sector energía, que se actualiza cada cinco años dados los cambios que se presentan permanentemente. En el año 2021 se convocó a su primera actualización.

Entre las principales metas de la política energética resultantes de la revisión del año 2021, se pueden destacar las siguientes, que inciden directamente en el desarrollo de las energías renovables:

- 100% energías cero emisiones al 2050 en generación eléctrica y 80% energías renovables al 2030.
- 60% menos emisiones anuales de GEI<sup>25</sup> en

sector energético al 2050, respecto a 2018, lo que permitirá alcanzar la carbono neutralidad antes del 2050.

- 100% de leña seca en todos los centros urbanos al 2030.
- 100% de las edificaciones nuevas, residenciales y no residenciales, con “consumo energía neta cero”.
- 100% de las ventas de vehículos livianos y medianos nuevos, y las nuevas incorporaciones de transporte público urbano, con cero emisiones al año 2035.
- 100% acceso a electricidad para todos los hogares al 2030 y al 2040 energía limpia de baja emisiones para satisfacer necesidades de calefacción, agua caliente sanitaria y cocción de alimentos.

25 GEI: Gases efecto invernadero.



- 6.000 MW en sistemas de almacenamiento de energía en el Sistema Eléctrico Nacional al 2050; 2.000 MW al 2030, tales como baterías electroquímicas, bombeo hidráulico, aire comprimido, aire líquido, entre otras tecnologías.
- Al 2040, Chile cuenta con los más altos estándares del mundo en confiabilidad y resiliencia del sistema energético.
- 1 hora máximo de indisponibilidad de suministro eléctrico promedio en el país al 2050, con menor nivel de dispersión a nivel comunal en relación al 2021.
- 25% de mejora de la intensidad energética de grandes consumidores de energía al 2050, respecto al año 2021.

## 6. Rol de las energías renovables en la independencia energética del país.

Las energías renovables desempeñan un rol relevante en la seguridad energética de Chile al contribuir a la reducción de la dependencia de los combustibles fósiles, de los cuales Chile no posee fuentes explotables. Así también, las ERNC permiten la diversificación de la matriz energética, disminuyen el impacto climático al reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>, permite la generación distribuida mejorando la calidad y confiabilidad del sistema, entre otros beneficios.

### 6.5. Reducción de la Dependencia de los Combustibles Fósiles.

Chile ha sido históricamente dependiente de la importación de combustibles fósiles para satisfacer sus necesidades energéticas. Hoy día, siendo un factor de riesgo los conflictos internacionales en la disponibilidad y precios de combustibles fósiles. La incorporación de energías renovables, como

la solar, la eólica, la hidroeléctrica y la geotérmica, reduce esta dependencia y disminuye la vulnerabilidad del suministro ante la volatilidad del suministro y precios de los combustibles fósiles en el mercado internacional.

### 6.6. Diversificación de la matriz energética.

La incorporación de ERNC provenientes de distintas tecnologías, permite diversificar la matriz energética, así Chile se vuelve menos vulnerable a las interrupciones en el suministro de energía debido a eventos como la escasez de combustibles fósiles o problemas en la infraestructura de transporte. La variedad de fuentes de energía renovable ofrece estabilidad y flexibilidad en la generación de electricidad.

### 6.7. Resiliencia ante el cambio climático.

Debido a la geografía chilena, es posible producir ERNC con diversas fuentes, según la región del país, como es el caso de la energía solar en el norte, geotérmica en el cordón volcánico y eólica en la zona centro y sur del país. Esto es importante en un contexto de resiliencia al cambio climático, al disminuir los riesgos asociados a eventos climáticos extremos. Además, reduce la necesidad de trasladar energía desde otras regiones, minimizando los riesgos de fallas de los sistemas de transmisión ante eventos climáticos.

### 6.8. Menores costos y previsibilidad.

La generación de energía a partir de fuentes renovables, como la solar y la eólica, a menudo tiene costos más predecibles y estables, en comparación con los combustibles fósiles que dependen de



mercados internacionales, lo que puede contribuir a la estabilidad en los precios de la electricidad en horizontes de mediano y largo plazo.

## 6.9. Generación distribuida

La generación de energía renovable distribuida, esto es cercana a los puntos de consumo (Ley 20.571), permite a los consumidores generar su propia energía y depender en menor grado de la red de transmisión, y con ello agrega una característica adicional de seguridad energética al sistema.

Así los consumidores y empresas pueden generar energía a pequeña escala, utilizando, por ejemplo, paneles solares en techos de edificios, permitiendo a consumidores generar su propia energía, sin perder la alternativa de consumir desde la red, cuando la planta propia no genere la suficiente energía requerida o inyectar los excedentes al sistema interconectado.

## 7. Seguridad energética

Hasta la década de 1950, el concepto de seguridad energética estuvo ligado al suministro de combustibles para las Fuerzas Armadas, ya que los conflictos modernos requieren de suministro de combustibles para aviones, tanques, vehículo de transporte, submarinos y buques.

La preocupación cambió desde el ámbito militar a lo civil, priorizando el suministro de combustibles fósiles para proveer de energía a las industrias y hogares, en una época de rápido crecimiento económico, lo que generó una dependencia de ellos. En las décadas precedentes han ocurrido varias crisis de abastecimiento de combustibles fósiles, como las crisis de 1974 y 1979, la Guerra del Golfo en 1990, los cortes de suministro de gas

desde Argentina a Chile en 2005 y, recientemente, el conflicto Rusia-Ucrania en 2021 que ha generado problemas de suministro de gas en Europa. Actualmente el conflicto Israelí-Palestino mantiene latente la preocupación por el suministro o alzas en el precio de petróleo.

Así, el enfoque de seguridad energética ha sido el aprovisionamiento continuo, suficiente y al menor costo posible de petróleo y gas.

El enfoque geopolítico privilegia tanto la geografía de los recursos y las rutas de acceso, como el análisis de fuerzas y los equilibrios de poder. Respecto de la soberanía, la asimetría de las relaciones de poder se interpreta como una amenaza que no es necesario que se materialice.

La visión geopolítica de la seguridad energética demostró ser insuficiente para relevar amenazas de distinto origen, surgiendo un análisis basado en las ciencias naturales, la ingeniería y la economía. Este enfoque de seguridad energética se basa en la existencia de límites globales y la vulnerabilidad de los sistemas tecnológicos complejos.

En el contexto de los límites globales, surge el cambio climático y el calentamiento global como una materia de seguridad energética, dados los efectos negativos que tendrían en la producción y transporte de combustibles y electricidad.

El desarrollo tecnológico ha implicado una mayor complejidad de los sistemas eléctricos, lo que conlleva más y mayores riesgos, incluyendo fallas técnicas, sabotajes, atentados, afectación por eventos naturales tales como huracanes, tormentas, tornados, tsunamis, inundaciones, terremotos, olas de altas temperaturas e incendios forestales. El suministro eléctrico es particularmente vulnerable ante estos



factores de riesgo, ya que son técnicamente complejos, cambian rápidamente y no son infalibles.

La seguridad energética requiere de un enfoque integrador de las ciencias políticas, desde la perspectiva de soberanía, la ingeniería con enfoque a la robustez y la economía con foco a la resiliencia, de forma de identificar las amenazas que afectan la seguridad energética y las estrategias de respuesta ante estos eventos.

### 7.1. Independencia energética

La dependencia de fuentes de energía externas para el suministro eléctrico puede poner en riesgo la seguridad energética de un país. Eventos como interrupciones o escasez en el suministro de gas o petróleo, o de la importación de electricidad en países interconectados pueden afectar negativamente la economía, la calidad de vida de la población y la operación de servicios críticos, como hospitales y otros servicios básicos.

En efecto, en los años 2021 y 2022, hubo un incremento en el precio del gas natural y una menor disponibilidad de su suministro a nivel internacional, como consecuencia del conflicto Rusia-Ucrania, lo que incidió en el costo de la energía eléctrica.

Generar electricidad de forma segura e independiente de otros países es fundamental en situaciones de desastres naturales, como terremotos, huracanes o inundaciones.

La capacidad de generar energía de manera autónoma contribuye a la soberanía energética de un país. Esto significa que el país no está sujeto a la

influencia o manipulación de fuentes de energía extranjeras o de actores internacionales.

Además, el promover la independencia energética mediante la diversificación de las fuentes de energía, principalmente renovables, permite tener precios de energía estables y reducir la vulnerabilidad ante la volatilidad de los precios de los combustibles fósiles.

### 7.2. La Ciberseguridad surge como nueva amenaza

En la medida que el sistema eléctrico incorpora nuevas tecnologías para su digitalización, las amenazas de ataque cibernéticos adquieren gran relevancia, debido a que los puntos de acceso a la red se incrementan exponencialmente y, con ello, el riesgo de interrupción del suministro eléctrico. Ante estos nuevos escenarios se hace imprescindible generar políticas públicas que regulen estas materias, que posibiliten el acceso a equipos de monitoreo, redes de prevención ante amenazas y equipos de respuesta ante incidentes no deseados. Sin embargo, la incorporación de políticas públicas en estas materias es un proceso lento, no acorde a la velocidad de avance de las nuevas amenazas cibernéticas, lo que mantiene un riesgo latente del sistema.

Uno de los ataques cibernéticos más notorios ocurrió en Ucrania en diciembre de 2015 y diciembre de 2016. En ambos casos, se llevaron a cabo ataques coordinados que causaron apagones en varias regiones de ese país, unas 230.000 personas quedaron hasta seis horas sin suministro. Hackers informáticos se infiltraron en tres compañías de distribución en distintas regiones de Ucrania.<sup>26</sup>

26 Disponible en: <https://www.dw.com/es/seis-ataques-cibern%C3%A9ticos-que-sacudieron-el-mundo/a-46967214>



En mayo de 2021 en Estados Unidos de América el oleoducto Colonial Pipeline<sup>27</sup> se desconectó después de sufrir un ataque de ransomware.<sup>28</sup> Este oleoducto transporta el combustible desde las refinerías de la costa del Golfo hasta Nueva Jersey, abasteciendo, aproximadamente, la mitad de la gasolina y el diésel que consume la costa Este, siendo el oleoducto más importante de Estados Unidos. Si bien, no es infraestructura eléctrica, este evento muestra la vulnerabilidad de los sistemas energéticos a los ciberataques.

Chile está tomando acciones en esta materia, encontrándose actualmente en trámite el proyecto de Ley Marco de Ciberseguridad.

En el sector eléctrico, el operador del sistema ha definido un estándar de ciberseguridad y protección de infraestructura crítica, el que inició su aplicación en el año 2020.<sup>29</sup>

Además, en el Senado se está tramitando un proyecto de ley para la protección física de la infraestructura crítica en caso de peligro grave o inminente, por parte de las Fuerzas Armadas.

El año 2008 el Consejo Europeo dictó la Directiva 2008/114/CE, la que define la infraestructura crítica como: *“el elemento, sistema o parte de este situado en los Estados miembros que es esencial para el mantenimiento de funciones sociales vitales, la salud, la integridad física, la seguridad, y el bienestar social*

*y económico de la población y cuya perturbación o destrucción afectaría gravemente a un Estado miembro al no poder mantener esas funciones”*.<sup>30</sup>

### 7.3. Resiliencia

La oficina de Naciones Unidas para Reducción de Riesgos de Desastre (UNDRR), define la resiliencia como: *“la capacidad que tiene un sistema, una comunidad o una sociedad expuestos a una amenaza para resistir, absorber, adaptarse y recuperarse de sus efectos de manera oportuna y eficiente, en particular mediante la preservación y la restauración de sus estructuras y funciones básicas por conducto de la gestión de riesgos”*.<sup>31</sup> Por lo tanto, el disponer de infraestructura energética resiliente es un factor relevante para garantizar su seguridad.

Besant-Jones y otros, plantean que una infraestructura adecuada es un factor explicativo de la capacidad de los países de diversificar sus economías, expandir el comercio, responder al crecimiento demográfico, reducir la pobreza y mejorar sus condiciones medioambientales. La provisión eficiente y adecuada de los servicios de infraestructura depende la implementación eficaz de políticas de desarrollo social y económico.

En el caso de la infraestructura destinada al suministro eléctrico, sus interrupciones pueden causar pérdidas económicas significativas, ya que las industrias, mineras y PYMES dependen en gran

27 Disponible en: <https://cnnespanol.cnn.com/2021/05/13/oleoducto-colonial-reinicia-operaciones-gasolina-ciberataque-hackeo-trax/>

28 El ransomware, es un tipo código informático malicioso que impide la utilización de equipos o sistemas que infecta. El hacker toma control del equipo o sistema infectado y lo secuestra de varias maneras, cifrando la información, bloqueando la pantalla u otras acciones.

29 Disponible en: [https://www.coordinador.cl/wp-content/uploads/portales/reportes\\_estadisticas/Est%C3%A1ndar%20de%20Ciberseguridad%20SEN%20Final%202020-07-2020.pdf](https://www.coordinador.cl/wp-content/uploads/portales/reportes_estadisticas/Est%C3%A1ndar%20de%20Ciberseguridad%20SEN%20Final%202020-07-2020.pdf)

30 Texto extraído de Boletín N° 16.143-02 Proyecto de ley para proteger infraestructura crítica.

31 UNDRR (Oficina de Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres) (2012), Making Cities Resilient Report 2012, Ginebra.





medida de la electricidad. Por lo tanto, es necesario diseñar la infraestructura de la red eléctrica para que sea resiliente ante fallas de equipos y eventos de la naturaleza. En ese sentido, la abundante disponibilidad de recursos de energía renovable en el país, su diversidad geográfica y tecnológica permiten generar un diseño de red que sea altamente confiable y seguro, lo que redundará en la estabilidad económica y social.

#### 7.4. Cambio en los equilibrios geopolíticos.

El potencial de energía renovable para la producción de electricidad en el país, el cual supera con creces la demanda actual y futura, presenta una oportunidad de transformar a Chile en un exportador de energía, ya sea entregando energía eléctrica en un contexto de electrificación de la demanda que permita la interconexión con otros países de la región, o bien a través del vector energético llamado hidrógeno verde o renovable, que permite el almacenamiento de la energía eléctrica generada a partir de fuentes renovables, su transporte y uso posterior.

Esto generaría un cambio en los equilibrios geopolíticos de la región, como consecuencia de la descarbonización de la matriz energética global, teniendo Chile la posibilidad de incrementar su influencia a nivel global.

#### Conclusiones.

Las acciones de mitigación del cambio climático, implican el desarrollo de los recursos energéticos renovables, consideradas energías limpias.

Chile dispone montos relevantes de recursos renovables que superan con creces la demanda

del país, generando oportunidades de exportación de energía como electricidad o hidrógeno verde.

El país ha tenido un crecimiento acelerado de las energías renovables y la disponibilidad de recursos renovables contribuye a la seguridad energética del país, aspecto relevante en un contexto global volátil de los mercados energéticos.

La capacidad de generar energía de manera autónoma significa que el país puede enfrentar mejor las crisis producidas por catástrofes naturales u otros, permitiendo mantener activa la infraestructura crítica.

En la medida que el sistema eléctrico incorpora nuevas tecnologías para su digitalización, se incrementan los riesgos por ataques cibernéticos por lo que se hace primordial avanzar en políticas públicas que regulen estas materias y permitan incorporar sistemas de mayor seguridad.

#### Bibliografía

BESANT-JONES, John; ESTACHE, Antonio; INGRAM, Gregory; KESSIDES, Christine; LANJOUW, Peter; MODY, Ashoka; PRITCHETT, Lant. Informe sobre el desarrollo mundial 1994: infraestructura y desarrollo, Washington, D.C., Banco Mundial. 1994.

JACQUES, Clerc; OLMEDO, Juan Carlos; PERALTA, Jaime; SAAVEDRA, María Luisa; SAUMA Enzo; URZÚA Ignacio; HERNANDO, Andrés. "Energías Renovables en Chile: Hacia una inserción eficiente en la matriz eléctrica". Ediciones Centro de Estudios Públicos, 2018, ISBN 978-956-7015-60-3.

International Energy Agency (IEA). 2019, Renewables 2019: Analysis and forecasts to 2024, IEA, Paris, [en línea]. Disponible en <https://doi.org/10.1787/b3911209-en>



- International Energy Agency (IEA), 2019, Status of Power System Transformation 2019: Power System Flexibility. [en línea], disponible en: <https://www.iea.org/reports/status-of-power-system-transformation-2019>
- MESA DE GEOTERMIA. Rol de la geotermia en el desarrollo de la matriz eléctrica chilena. 2018. [en línea], disponible en: <https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/informe-final-mesa-geotermia.pdf>
- MINISTERIO DE ENERGÍA y GIZ. Energías renovables en Chile, el potencial eólico, solar en hidroeléctrico de Arica a Chiloé, 2014. [en línea], disponible en. <http://biblioteca.digital.gob.cl/handle/123456789/510>
- MINISTERIO DE ENERGÍA, Transición Energética de Chile Política Energética Nacional, Actualización 2022, febrero 2022. [https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/pen\\_2050\\_-\\_actualizado\\_marzo\\_2022\\_0.pdf](https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/pen_2050_-_actualizado_marzo_2022_0.pdf)
- RODRÍGUEZ, Víctor, "Seguridad energética Análisis y evaluación del caso de México", CEPAL, 2019.
- SFE. [en línea], disponible en: <https://www.sfe-solar.com/noticias/articulos/los-10-paneles-solares-mas-eficientes-del-mercado/#Mejores-tecnologias-y-eficiencia-de-Placas-Solares>
- VEGA de KUYPER, Juan Carlos; RAMÍREZ, Santiago. "Fuentes de energías renovables y no renovables. Aplicaciones". Editorial Alfaomega, 2014. ISBN: 9786077078203
- WORLD ENERGY TRADE. [en línea], disponible: <https://www.worldenergytrade.com/energias-alternativas/energia-eolica/como-funcionan-los-aerogeneradores>