



ENERGÍAS RENOVABLES:

ESCENARIO ACTUAL Y PERSPECTIVAS FUTURAS

Sonia Montecinos Geisse
Danilo Carvajal Araneda



EDITORIAL
UNIVERSIDAD
DE LA SERENA

ENERGÍAS RENOVABLES

ESCENARIO ACTUAL Y PERSPECTIVAS FUTURAS

Sonia Montecinos Geisse
Danilo Carvajal Araneda



ENERGÍAS RENOVABLES:

ESCENARIO ACTUAL Y PERSPECTIVAS FUTURAS

Sonia Montecinos Geisse / Danilo Carvajal Araneda

SERIE MONOGRAFÍAS Y TEXTOS ACADÉMICOS

Dirección de Investigación y Desarrollo ULS

ISBN 978-956-7052-47-9

Primera edición: agosto 2018

© Editorial Universidad de La Serena

Los Carrera 207 – Fono (56-51) 2204368 – La Serena – Chile

editorial@userena.cl

www.editorial.userena.cl

Imagen de portada, tomada de: <https://twenergy.com>

La presente monografía fue financiada por la Dirección de Investigación y Desarrollo de la Universidad de La Serena DIDULS y el proyecto de Cooperación Internacional CONICYT-BMBF 20140039.

En el documento se presentan resultados que fueron logrados gracias al financiamiento otorgado por los proyectos FONDEF D05I10038, el proyecto de Cooperación Internacional de CONICYT-BMBF 066-2007 y el proyecto FONDEF IDeA ID14I10016

Impreso en Gráfica Lom, Chile.

Esta publicación, incluido el diseño de la portada, no puede ser reproducida, almacenada o transmitida por cualquier medio, ya sea electrónico, químico, mecánico, óptico, de grabación o de fotocopia, sin permiso previo de Editorial ULS.

ÍNDICE

1. Introducción. ¿Qué es la energía?	9
2. Fuentes de energía	
2.1 Fuentes de energía no renovable	15
2.1.1 Combustibles fósiles	15
2.1.2 Energía nuclear	16
2.2 Fuentes de energía renovable	17
2.2.1 Energía solar	18
2.2.1.1 Plantas de concentración solar	20
2.2.1.2 Paneles fotovoltaicos	22
2.2.2 Energía eólica	25
2.2.3 Energía hidroeléctrica	32
2.2.4 Energía de biomasa o bioenergía	33
2.4 Geotermia	35
3. Situación energética. Contexto mundial	37
4. Situación energética. Contexto chileno	43
4.1 Sistema Eléctrico Chileno	43
4.2 Políticas que incentivan la incorporación de las ERNC a la matriz energética chilena	44
4.3 Participación de las ERNC en la matriz energética nacional	48
4.4 Potencial de recursos ERNC en Chile	50
5. Pronóstico de generación de ERNC	55
5.1 Pronóstico de energía eólica	57
5.1.1 Preparación de datos de entrada	59
5.1.2 Resultados: Pronóstico de la energía que genera el parque eólico Totoral	63
6. Futuro de las energías renovables	65
Anexo. Centrales ERNC instaladas en Chile	69
Referencias	80

AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer, de manera especial, a la empresa Latin America Power por proveer datos para fines de investigación.

Agradecemos al Centro de Energía Solar e Investigación de Hidrógeno (ZSW) y a nuestros colegas y amigos Karina Ávalos, Oriana Muñoz, Ilaria Anna Colussi y Carlos Rodríguez por leer el manuscrito y contribuir con valiosas sugerencias.

GLOSARIO DE TÉRMINOS

- a.C.:** antes de Cristo
- BMBF:** Ministerio Alemán de Capacitación e Investigación
- RNA:** Redes Neuronales Artificiales
- CC:** Cambio Climático
- CEAZA:** Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas
- CDEC-SEN:** Centro de Despacho de Carga del Sistema Eléctrico Nacional
- CDEC-SIC:** Centro de Despacho de Carga del Sistema Interconectado Central.
- CNE:** Comisión Nacional de Energía
- EE:** Eficiencia Energética
- ERNC:** Energías Renovables No Convencionales
- FP:** Factor de Planta
- FV:** fotovoltaico
- GIZ GmbH:** Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (Agencia Alemana de Cooperación Internacional)
- GW:** $10^9 \text{ W} = 10^6 \text{ kW} = 10^3 \text{ MW}$
- GWh:** $10^9 \text{ Wh} = 10^6 \text{ kWh} = 10^3 \text{ MWh}$
- J=** Joule. Unidad de energía en el sistema MKS
- KAMM:** Karlsruhe Atmospheric Mesoscale Model
- kW:** 10^3 W
- kWh:** 10^3 Wh
- Mtep:** Millones de toneladas equivalentes de petróleo.
- MW:** 10^6 W
- MWh:** 10^6 Wh
- OCDE:** Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico
- OMM:** Organización Meteorológica Mundial
- PE 2015:** Política energética 2050
- PN:** Potencia nominal
- PCS:** Planta de concentración solar
- ppm:** partes por millón
- RMSE:** raíz del error cuadrático medio
- SEN:** Sistema Eléctrico Nacional
- SIC:** Sistema Interconectado Central
- SING:** Sistema Interconectado del Norte Grande
- W:** Watts: Unidad de potencia en el sistema MKS (J/segundo)
- Wh:** Watts-hora: Unidad de energía ($1 \text{ Wh} = 3,600 \text{ J}$)

1

INTRODUCCIÓN ¿QUÉ ES LA ENERGÍA?

En su definición más básica, energía es la capacidad para realizar trabajo o una acción. La energía se conserva, no se crea ni se destruye, sino sólo puede transformarse de una forma a otra.

Después del aire y el agua, la energía es el factor más importante para la sobrevivencia de la vida sobre la tierra. La tierra extrae su energía principalmente del sol, sin el cual las temperaturas sobre la superficie serían inferiores a -200°C , condiciones que no permitirían la existencia de las formas de vida que conocemos.

El ser humano, como todos los animales, extrae la energía para sus actividades cotidianas de los alimentos que consume. Sólo para sus actividades metabólicas, una persona consume una potencia¹ de cerca de 80 W [1], similar al consumo de un computador personal.

Existen distintas formas de energía, que reciben distintos nombres dependiendo de sus características. Algunos ejemplos: la energía que posee un cuerpo en movimiento se denomina *energía cinética*; la energía en la cual participan fenómenos eléctricos y magnéticos se dice *energía electromagnética*; se denomina *energía química* a la energía almacenada en enlaces químicos y que es liberada, por ejemplo, en el proceso de combustión o, en el caso de baterías químicas, en procesos de óxido-reducción; la *energía potencial gravitatoria* es la que tiene un cuerpo debido a la fuerza

1. **Potencia.** La cantidad de energía necesaria para cualquier actividad se mide a través de la Potencia (P) definida como la cantidad de energía por unidad de tiempo. En el Sistema Internacional de Unidades o sistema MKS, la energía se mide en Joules (J) y la potencia – energía gastada en 1 segundo - en Watts (W). Otra unidad de potencia muy usada es el Wh. Por ejemplo, una ampolla de 10 W de potencia gastará en el intervalo de una hora una energía de 10 Wh o 3,600 J. El consumo de electricidad de una vivienda se mide en kWh, y el monto mensual que se debe pagar dependerá de la cantidad de kWh consumidos.

de gravedad, la cual es proporcional a la altura sobre el suelo; en un proceso en donde hay intercambio de calor se habla normalmente energía de térmica, etc.

La transformación de un tipo de energía en otro es un fenómeno que se vive cotidianamente. Por ejemplo, al dejar caer un cuerpo desde una cierta altura, se observa que a medida que desciende, aumenta su velocidad. En este proceso la energía gravitatoria se transforma en energía cinética.

El primer hito importante en la historia de la humanidad se remonta a unos 600,000 años atrás con el control del fuego, lo que le permite contar con una fuente de energía que le proporciona calor, además de la posibilidad de cocinar los alimentos haciéndolos más fáciles de digerir. El fuego le permite además defenderse de animales salvajes y, por ende, aumentar sus probabilidades de sobrevivencia.

El siguiente gran hito en la historia humana se alcanza hace unos 11,000 años con la domesticación de plantas, lo que da comienzo a la agricultura, permitiendo al ser humano abandonar su vida nómada y establecerse en poblados.

El desarrollo de la agricultura trae consigo también un aumento de los requerimientos energéticos, que incluye la necesidad de arar la tierra, cosechar los productos que cultiva, molienda de granos para el consumo directo y para la producción de aceite. El aumento del trabajo requerido en todos estos procesos significó un enorme desafío desde el punto de vista tecnológico, desde la construcción de pozos y canales de regadío hasta la mejora de técnicas de molienda.

Las primeras máquinas simples como palancas y poleas fueron inventadas por Arquímedes unos 200 años a.C. Estas máquinas, aunque no disminuyen la cantidad de energía necesaria para elevar una masa, permiten alivianar el esfuerzo muscular para dicha labor.

Los primeros intentos para satisfacer las necesidades energéticas a partir de fuentes distintas de la fuerza humana o animal, se hicieron a partir del uso de los recursos a libre disposición en la naturaleza. El uso del viento como fuente de energía -energía cinética del aire en movimiento- se remonta al tiempo de los faraones, en donde era usada como fuerza motora para mover barcos sobre el Nilo. Esta historia se repite en otras culturas, unos 1,500 años a.C., cuando los antepasados de los polinésicos

navegaban usando barcos a vela desde el continente hacia la Isla de Pascua. La embarcación a vela fue el principal medio de transporte marítimo hasta mediados del siglo XIX cuando fue reemplazado por el barco a vapor. Sin embargo, actualmente el barco a vela sigue siendo utilizado, principalmente para fines recreativos.

Por otra parte, los molinos, tanto de viento como los hidráulicos que usan el flujo del viento o el caudal de un río para mover una rueda, fueron inventados principalmente para moler el grano (de ahí el nombre de molinos). Aparecen unos 1,400 años a.C., y fueron los primeros sistemas mecánicos que operaban sin el uso intensivo de trabajo humano o animal. Estos sistemas permitieron incrementar de manera considerable la producción de alimentos que, junto con la capacidad de transporte facilitada por los barcos de vapor, permitieron transportar los productos agrícolas dando lugar a otra actividad importante: el comercio.

La máquina de vapor es el primer invento del ser humano para producir trabajo a partir de un material combustible. La primera máquina de este tipo, la *eolípila* representada en la figura 1, fue inventada en el siglo I por Herón de Alejandría, y consistía en una esfera con tubos curvos, en los cuales se dejaba entrar vapor de agua que, al escapar por los tubos, producía que la esfera gire (principio de acción y reacción) [2]. Esta máquina no se inventó para fines prácticos, sino para entretenimiento. En este ejemplo se usaba energía térmica (del vapor de agua) para ser transformada en movimiento (energía cinética).

Recién diecisiete siglos después, en el siglo XVIII, Thomas Newcomen desarrolló una máquina de vapor funcional que permitía extraer agua de una mina. Esta máquina constituye el primero en su tipo que usa car-



Figura 1. Eolípila, primera máquina a vapor. Fuente: [2]

bón para utilización industrial. Aunque de baja eficiencia -3%, es decir el 97% de la energía contenida en el carbón se emitía por la chimenea- por primera vez se disponía de una máquina que era independiente de los recursos que hoy llamamos renovables.

Con el invento de la máquina de vapor se da comienzo a una nueva era, en donde se crean máquinas cada vez más sofisticadas y eficientes, que permiten al ser humano realizar tareas que no serían posible usando sólo la musculatura -humana y/o animal-, y en un tiempo mucho menor. También le permite movilizarse distancias más largas y en menor tiempo.

A pesar de que el uso de las máquinas ofrece muchas ventajas a la humanidad, también tiene efectos secundarios negativos. El uso masivo de combustibles fósiles como el carbón trae consigo la emisión al ambiente de gases como el monóxido de Carbono (CO), dióxido de Azufre (SO₂), dióxido de Nitrógeno (NO₂), causantes de efectos dañinos al medio ambiente, además de material particulado perjudicial para seres humanos y animales. Adicionalmente, se emite dióxido de Carbono (CO₂) el cual es un gas de efecto invernadero² (GEI), siendo uno de los causantes probables del aumento de la temperatura promedio sobre la tierra.

2. **¿Qué es el efecto invernadero?** El efecto invernadero es lo que hace posible el desarrollo de la vida sobre nuestro planeta. Está basado en la radiación de cuerpo negro, que es un sistema que absorbe toda la luz que incide sobre él, y emite toda la radiación que está en su interior, de modo que está siempre en equilibrio térmico con el exterior. El valor de la longitud de onda en donde se alcanza el valor máximo de la radiación emitida (llamada radiación térmica), es inversamente proporcional a la temperatura (ley de desplazamiento de Wien), y la radiación total es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura. Este efecto, que no puede ser entendido en base a la teoría clásica, fue explicado por Max Planck en el año 1900 [3]. De acuerdo a esta ley, el sol, que tiene una temperatura superficial de cerca de 6,000°C, alcanza el máximo de radiación en el rango visible, mientras que la tierra, con una temperatura media superficial de unos 15°C, alcanza su máximo valor en el rango infrarrojo.

Si toda la radiación térmica que emite la tierra fuera emitida al espacio, la tierra tendría una temperatura media de unos 35°C bajo cero, muy baja para permitir el desarrollo de la vida como la conocemos. La atmósfera de la tierra está compuesta por una serie de gases entre los cuales está el CO₂ y el vapor de agua, que tienen la facultad de absorber la radiación infrarroja emitida por la tierra, enviándola posteriormente a la superficie. Este efecto se llama efecto invernadero. Sin embargo, el aumento no controlado de CO₂ en la atmósfera puede producir aumentos en la temperatura, lo que podría tener efectos negativos importantes como el derretimiento de glaciares -que constituyen una reserva importante de recursos hídricos- además del derretimiento de los casquetes polares.

Para que las máquinas realicen el trabajo para el cual fueron diseñadas, es necesario disponer de una fuente de energía externa. Lo que antes se realizaba usando la fuerza muscular -en donde los requerimientos energéticos coincidían con la necesidad de alimento- las primeras máquinas usaban combustibles fósiles, con las consecuencias negativas ya mencionadas.

El requerimiento energético para realizar algún trabajo útil depende de factores como el tipo y cantidad de máquinas que se usen, el tipo de combustible y la eficiencia de la tecnología para transformar el combustible en trabajo útil.

Mejorar la eficiencia de las tecnologías es importante, no solamente desde el punto de vista medioambiental, sino también desde el punto de vista económico. El invertir en tecnologías más eficientes trae como consecuencia una disminución de la cantidad de combustible necesario para generar un producto, lo que puede compensar el costo de inversión.

Es importante diferenciar entre eficiencia energética (EE) y ahorro de energía (AE). La EE se refiere a disminuir el gasto energético a través de la inversión en tecnologías más eficientes, que usen menos combustible obteniendo el mismo beneficio. Por ejemplo, disminuir el consumo de energía domiciliaria puede hacerse encendiendo menos luces (AE) o reemplazando las luminarias por unas de menor consumo energético pero que generen la misma potencia lumínica (EE).

La eficiencia es un parámetro adimensional definido como la razón entre la potencia generada y la potencia consumida. Por ejemplo, la eficiencia de un panel fotovoltaico, se calcula como la razón entre la potencia generada y la radiación solar que incide sobre la superficie del panel.

Un parámetro que permite comparar la eficiencia de dos tecnologías es el *rendimiento*. Para ilustrar este concepto consideremos un ejemplo: El rendimiento de un automóvil puede medirse en términos de la distancia recorrida por cantidad de combustible (km/litro), mientras que la eficiencia es la razón entre la cantidad de energía gastada en recorrer una cierta distancia y el contenido energético contenido en el combustible que se usó para ese fin. Podemos decir que un vehículo es más eficiente que otro si su rendimiento es mayor.

A medida que se van desarrollando nuevas tecnologías, el requerimiento de energía va aumentando, por lo que la EE empieza a ganar

relevancia en el esfuerzo por disminuir el consumo energético de la humanidad.

2

FUENTES DE ENERGÍA

Para satisfacer las necesidades energéticas que alimentan las tecnologías usadas por el hombre para su bienestar, se usan fuentes de energía que podemos distinguir entre renovables y no renovables, y que se describen a continuación.

2.1. Fuentes de energía no renovable

Las fuentes de energía no renovable son aquellas fuentes que, a escala humana, no se renuevan, sino que se van agotando a medida que se usan. Entre las fuentes no renovables actualmente en uso, podemos distinguir dos tipos: los combustibles fósiles y la energía nuclear [3].

2.1.1. Combustibles fósiles

Desde la revolución industrial, las fuentes de energía más usadas por el ser humano son los combustibles fósiles: carbón, petróleo y gas natural, cuya formación se basa en la radiación solar. Bosques prehistóricos fueron la base para la formación del carbón, proceso que dura cerca de 300 millones de años. Asimismo, la formación del petróleo y gas natural es producto de procesos que tardan entre 300 y 500 millones de años. Se crean a partir de formas de vida prehistórica en el océano que, al descender hasta el fondo marino, se mezcla con sedimentos y arena.

Por el tiempo en que dura la formación de los combustibles fósiles, mucho mayor que la tasa de consumo de éstos, estos recursos se consideran como no-renovables, es decir, una vez que se han consumido se acaban y no se pueden recuperar a escalas de vida humana.

En el proceso de combustión involucrado en el uso de estos combustibles se emiten a la atmósfera cantidades considerables de CO_2 , que es considerado como uno de los factores más importantes en el Cambio Climático (CC) [5].

La transformación de los combustibles fósiles en otra forma de energía se hace por medio del proceso de combustión. En este proceso se genera calor que puede ser usado directamente para fines de calefacción, cocción de alimentos o fundición de metales, o para generar vapor que moverá una turbina donde finalmente, por el principio de inducción magnética³, se generará electricidad.

2.1.2. Energía nuclear

La energía nuclear es aquella que se puede obtener del núcleo de un átomo. Existen dos formas de energía nuclear: i) la fisión nuclear que es el proceso en el cual un núcleo pesado, como el Uranio 235 (^{235}U) o Plutonio 239 (^{239}Pu) se divide en dos núcleos más livianos, produciendo, además de calor, otros subproductos no deseados como radiación gamma; ii) la fusión nuclear que consiste en la unión o fusión de dos núcleos livianos, como por ejemplo el Hidrógeno (H), para formar un núcleo más pesado, en este caso Helio (He), liberando, como en el caso de la fisión nuclear, calor. En ambos casos, lo que se usa para generar energía es el calor. Si se desea generar electricidad, el calor se usa para generar vapor con el que se mueve una turbina, de la misma manera que cuando se genera electricidad a partir de combustibles fósiles.

La fisión y la fusión nuclear generan calor por el mismo principio: la equivalencia entre masa y energía $E=mc^2$ (E , m y c la energía, masa y velocidad de la luz, respectivamente) propuesta por Albert Einstein en 1905 en la Teoría Especial de la Relatividad [6]. Esta teoría plantea la revolucionaria idea de que en el universo la masa no se conserva, sino que se puede transformar en energía. Del mismo modo, se plantea la posibilidad de que la energía puede transformarse en materia, lo que echa por tierra la por tantos años aceptada ley de conservación de energía.

3. ¿Qué es la inducción magnética?

Es el proceso mediante el cual el flujo de un campo magnético a través de un circuito de un material conductor (metal) induce corrientes eléctricas. Este fenómeno, conocido también como Ley de Faraday [3], fue descubierto por Michael Faraday en el año 1831, y es el principio básico por el cual operan transformadores, generadores, motores eléctricos, y otras máquinas eléctricas.

En el caso de la fisión nuclear, un núcleo pesado se divide en dos, siendo la suma de las masas de los núcleos resultantes menor que la masa del átomo original. De acuerdo a la Teoría de la Relatividad, la masa restante se ha transformado en energía. Por su parte en la fusión nuclear, dos núcleos livianos se fusionan formando un núcleo distinto, siendo la masa del núcleo resultante menor a la suma de la masa de los átomos fusionados. Como en el caso anterior, la diferencia de masa resultante en este proceso se transforma en energía.

La fisión nuclear tiene la gran desventaja de que en el proceso se generan residuos en la forma de elementos radiactivos de alta vida media que son difíciles de manejar. Este problema no lo tiene la fusión nuclear, la cual, además de no dejar residuos tóxicos, el combustible necesario para un reactor de fusión (hidrógeno) se encuentra, en principio, de manera abundante en la naturaleza, por lo que podría considerarse como una fuente de energía renovable. Sin embargo, para poder lograr la fusión se requiere unir dos núcleos, siendo necesario vencer la fuerza eléctrica repulsiva hasta acercarlos lo suficiente como para que la fuerza nuclear, que es atractiva y de corto alcance, actúe logrando la fusión. Para este fin, es necesario invertir gran cantidad de energía, lo que hace que ésta no sea rentable económicamente, por lo que los reactores de fusión existentes en la actualidad son aún de carácter experimental [7].

La energía nuclear tiene la clara ventaja frente a los combustibles fósiles de que no hay emisión de CO_2 a la atmósfera.

2.2. Fuentes de energía renovable

El desarrollo tecnológico trae consigo una demanda cada vez mayor de energía, con efectos que no pueden ser ignorados. Esto ha hecho que el ser humano retorne su mirada al uso de los recursos renovables que, no dejando de lado los beneficios obtenidos con las máquinas, reemplacen, al menos en parte, los combustibles tradicionales que permiten su funcionamiento. Aparece así la tendencia al desarrollo de tecnologías que permitan extraer energía de fuentes cuyo abastecimiento es ilimitado en la naturaleza, que son las llamadas fuentes renovables.

Es importante recalcar que un recurso puede considerarse renovable en la medida que el tiempo de recuperación de éste sea menor o

similar al tiempo de explotación. Este criterio convierte a los combustibles fósiles, que tardan cientos de millones de años en recuperarse, en recursos no renovables.

Como se mencionó anteriormente, las fuentes que llamamos renovables – sol, viento, agua, entre otras - han sido utilizadas por la humanidad desde tiempos antiguos para generar trabajos mecánicos. Por ejemplo, las ruedas de agua eran usadas hace ya unos 3,000 años en Mesopotamia, mucho antes de que se conociera la electricidad. Sin embargo, a pesar de que los recursos naturales se encuentran a libre disposición, su aprovechamiento para usarlas como fuentes de energía en la forma en que la sociedad moderna lo requiere, necesita de un desarrollo tecnológico importante.

A continuación, se describen los recursos renovables, así como algunas de las tecnologías que permiten su explotación.

2.2.1. Energía solar

La energía solar es lejos una de las fuentes más importantes de energía disponible. La tierra recibe en un año cerca de 10^{12} GWh, cantidad suficiente para cubrir las necesidades de energía de la humanidad en sus tres formas más importantes: térmica (calefacción), energía eléctrica y transporte [3]. Sin embargo, esto no es suficiente para que su uso reemplace los combustibles fósiles de manera inmediata. Además del desarrollo de tecnologías que permitan usarlo para los distintos tipos de necesidades, no siempre el recurso solar existe en el lugar de la demanda, por lo que debe ser transportado.

El sol es también la fuente de otros recursos renovables:

- El viento es el movimiento de las masas de aire que rodean la tierra. El sol es el motor que produce los llamados *vientos térmicos*, que ocurren por el calentamiento diferencial de la superficie terrestre. El aire frío es más denso -es decir un mismo volumen es más *pesado*- que el aire caliente, causando diferencias de presión, lo que provoca que las masas de aire frío se desplacen a lugares más cálidos generando, por ejemplo, brisas que van desde el mar

hacia la tierra durante el día y en dirección contraria durante la noche [8].

- El sol es responsable de la existencia del ciclo del agua, gracias al cual existen los ríos, glaciares y aguas subterráneas. El sol es la fuente de energía para el derretimiento de la nieve y glaciares, permitiendo que el agua fluya y percole a través de la superficie terrestre formando los ríos subterráneos y superficiales. Del mismo modo, gracias a la energía del sol, el agua superficial se evapora para luego formar las nubes, que son la fuente de precipitaciones, ya sea en forma de lluvia o nieve.
- Biomasa. Las plantas puedan generar biomasa a través del proceso de fotosíntesis, para el cual requieren, además CO_2 , de la energía solar.
- La energía contenida en los combustibles fósiles como carbón, petróleo y gas natural se basa en la energía solar. Estos elementos fueron generados hace millones de años por la fotosíntesis de vegetales y, en el caso del petróleo y gas natural, a través de la descomposición de materia orgánica por microorganismos.

La cantidad de energía solar que llega a la tierra se mide a través de la llamada constante solar S que representa la radiación solar que alcanza la parte alta de la atmósfera. A pesar de su nombre, la constante solar no es constante, sino que varía por muchas razones, siendo la principal el hecho de que la órbita de la tierra no es circular, sino que describe una elipse alrededor del sol, por lo que la distancia Tierra - Sol es variable. En un año S fluctúa entre 1.33 kW/m^2 y 1.42 kW/m^2 [9].

La radiación solar está compuesta por luz de distintas longitudes de onda, que se denomina *espectro solar*. La mayor parte de la radiación que emite el sol está en el rango visible, que abarca desde los 390 nm (violeta) y 750 nm (luz roja), y que corresponde al rango de longitudes de onda en donde el ojo del ser humano es sensible. La luz con longitud de onda mayor al rojo y menor al azul se denomina luz infrarroja y luz ultravioleta, respectivamente.

En su paso por la atmósfera, la radiación es atenuada por los distintos gases que la componen, incluido el vapor de agua. El efecto de la atmósfera sobre la radiación solar no es la misma sobre todo el espectro,

sino que difiere según la longitud de la onda. Por ejemplo, en el rango visible la atmósfera es prácticamente transparente, por lo cual gran parte de la radiación en este rango alcanza la superficie. En el rango ultravioleta (UV), el ozono (O_3) absorbe parte importante de la radiación por lo que actúa como escudo que protege a la tierra de esta radiación, que es nociva para la vida sobre el planeta. Por otra parte, el vapor de agua, es uno de los responsables de la atenuación de la radiación infrarroja que alcanza la tierra [9].

La radiación global que alcanza la superficie terrestre raramente supera los $1,000 \text{ W/m}^2$. Existen excepciones como por ejemplo en el valle del Elqui, en donde se detectan valores de hasta $1,200 \text{ W/m}^2$. En algunos lugares, el máximo promedio en verano alcanza los $1,100 \text{ W/m}^2$ [10].

La transformación de energía solar en energía térmica es una experiencia cotidiana: si se deja un envase con agua al sol, al cabo de un rato el agua se calienta, pudiendo alcanzar 50°C o más, dependiendo de las características del envase. Actualmente es común ver en el mercado las llamadas duchas solares, que usan este principio.

La generación de energía térmica a partir del sol puede hacerse más eficiente si se usa superficies de alta absorción solar y baja emisividad, acompañado de estanques aislados que permiten mantener el agua caliente para ser usada en momentos en donde no hay radiación solar. Existen distintos tipos de tecnologías que permiten este proceso que se denominan colectores, con distinto grado de eficiencia, y que alcanzan valores por sobre el 90%.

Para poder generar electricidad a partir de energía solar, las tecnologías son distintas. Por un lado, están las plantas de concentración solar (PCS), que usan la energía del sol para generar vapor que luego es transformado en electricidad y, por otro lado, están los paneles fotovoltaicos (FV) que generan electricidad directamente de la luz solar.

2.2.1.1. Plantas de concentración solar

Este tipo de centrales reciben la radiación directa del sol que, mediante el uso de distintas tecnologías, permiten calentar un líquido. Por medio de un intercambiador de calor, la energía térmica así generada es usada para producir vapor que, de manera similar que las plantas termoeléctricas, es

usado para mover una turbina que finalmente generará electricidad. El calentamiento del líquido se realiza por medio de espejos que permiten concentrar la luz solar en un punto, en donde se encuentra el líquido conductor. Para aprovechar mejor la radiación directa del sol, estos sistemas disponen de un mecanismo que les permite seguir la trayectoria del sol.

Existen distintos tipos de tecnologías de PCS, siendo algunas de ellas [11]:

- i. Colector parabólico:* El sistema de espejos está ubicado en una superficie parabólica, en cuyo eje se encuentra un tubo que contiene el líquido conductor del calor (aceite térmico, o vapor de agua sobrecalentado). Este tipo de sistema logra aumentar la radiación solar en el eje entre 30 y 80 veces, logrando que el líquido alcance temperaturas de hasta 500°C, lo que proporciona una eficiencia termodinámica bastante alta.
- ii. Colector de Fresnel.* Está compuesto de muchos pequeños espejos o *lentes de Fresnel*, ligeramente curvados dispuestos de modo que concentran la radiación del sol en un tubo absorbente. Usa agua u otro fluido como líquido conductor y puede alcanzar temperaturas de hasta 400°C [11].
- iii. Central solar de torre central.* Está compuesto por un conjunto de espejos llamados *heliostatos* que se mueven sobre dos ejes, lo que le permite seguir la trayectoria del sol. Para captar mejor la radiación, normalmente estos espejos tienen una curvatura. La radiación solar concentrada es absorbida en el *receptor*, en donde se transfiere en forma de calor que puede ser agua, sal fundida o aire, pudiéndose alcanzar temperaturas sobre los 500°C [12].

Las PCS pueden generar gran cantidad de energía. Sin embargo, debido al ciclo diario de la radiación solar, la generación en general no ocurre cuando existe mayor demanda. Existen actualmente investigaciones respecto a formas de almacenamiento de esta energía para su mejor aprovechamiento [13].

2.2.1.2. Paneles fotovoltaicos

Los paneles fotovoltaicos están compuestos por *celdas fotovoltaicas* o *fotoceldas*, cuyo principio de funcionamiento es el *efecto fotovoltaico*, que es la propiedad que tienen ciertos materiales, llamados semiconductores, de generar una diferencia de potencial entre dos puntos cuando incide sobre él radiación solar (o radiación electromagnética).

Para que pueda haber efecto fotovoltaico es necesario que ocurra primero el *efecto fotoeléctrico*⁴ [3].

La base de un dispositivo solar fotovoltaico es la unión de dos semiconductores (uno tipo *n* y otro tipo *p*). Al incidir la radiación solar sobre la superficie del panel, la luz es absorbida por el semiconductor *p* para generar electrones, los que son enviados al semiconductor *n*, para luego ser colectados generando así una corriente eléctrica [14].

A pesar de que las celdas fotovoltaicas absorben cerca de un 80% de la radiación incidente, la mayor parte de esta energía se transforma en calor aumentando la temperatura de la celda, lo que provoca una disminución del voltaje de circuito abierto y, por ende, reduciendo la potencia máxima que puede generar la celda.

Los primeros avances en el desarrollo de una celda solar datan del año 1914. Sin embargo, el primero en patentar una celda fue el ingeniero estadounidense Russell Ohl en el año 1946. El desarrollo moderno de la celda solar comienza recién ocho años después cuando en el año 1954 los estadounidenses Gerald Pearson, Calvin S. Fuller y Daryl Chapin de los Laboratorios Bell descubrieron de manera accidental que los semiconductores de silicio dopado con ciertas impurezas eran muy sensibles a la luz, lo que contribuyó a la fabricación de la primera fotocelda comercial.

4. ¿Qué es el efecto fotoeléctrico?

El efecto fotoeléctrico fue descubierto por Heinrich Hertz en el año 1888. Es el fenómeno por el cual es posible extraer electrones de un metal haciendo incidir sobre él radiación electromagnética. Según los experimentos, este efecto no depende de la intensidad de la luz incidente, sino que ocurre sólo para radiación de una frecuencia suficientemente alta (en el rango ultravioleta). Este efecto fue explicado en el año 1905 por Albert Einstein, al postular que la luz estaba compuesta por fotones o *quantum* de luz cuya energía es proporcional a la frecuencia, lo que le valió el Premio Nobel en 1926.

Inicialmente, las celdas fotovoltaicas fueron utilizadas principalmente para el desarrollo de juguetes y otros usos menores. Posteriormente, su aplicación más importante fue en el campo de la carrera espacial.

La eficiencia que puede alcanzar una celda fotoeléctrica -entendida como la razón entre la potencia incidente sobre la celda y la potencia eléctrica generada- se ve limitada principalmente por el hecho de que son sensibles a la radiación de alta frecuencia (ultravioleta), mientras que la radiación solar alcanza el máximo valor en el rango visible. Para el caso de celdas de silicio, la mayor eficiencia que se ha alcanzado a la fecha en condiciones de laboratorio es de un 29% [15]. Los paneles comerciales tienen una eficiencia bastante menor, alcanzando valores de hasta un 19%.

La cantidad de energía que un panel o un parque FV puede producir, se mide mediante el *Factor de Planta* (FP)⁵. El FP se define como el porcentaje de energía real que genera una celda o un parque con respecto a lo que rendiría en condiciones ideales, es decir, generando siempre a su máxima potencia.

El FP de un parque FV depende de las condiciones meteorológicas del lugar. Debido a que durante el periodo nocturno no hay radiación solar, el FP rara vez supera el 20%. La figura 2 muestra el ciclo diario de la radiación incidente promedio en verano e invierno, y el ciclo diario promedio anual en un sitio ubicado el Valle del Elqui, a 20 km al este de la ciudad de La Serena.

5. ¿Cómo calcular el FP?

Supongamos un parque solar FV que tiene una potencia nominal (PN) de 1 MW, y que este parque genera en un año la cantidad de energía $E=1,200$ MWh. Para conocer el FP necesitamos calcular la energía ideal (E_{id}), es decir, la energía que generaría en este mismo periodo de tiempo, si estuviera produciendo siempre en su máxima potencia. Este valor se calcula multiplicando PN por el número de horas que tiene un año: $E_{id}=1MW*365*24h=8,760$ MWh. El FP en este caso es:

$$FP = \frac{E}{E_{id}} = \frac{1,200}{8,760} * 100\% = 13.7\%$$

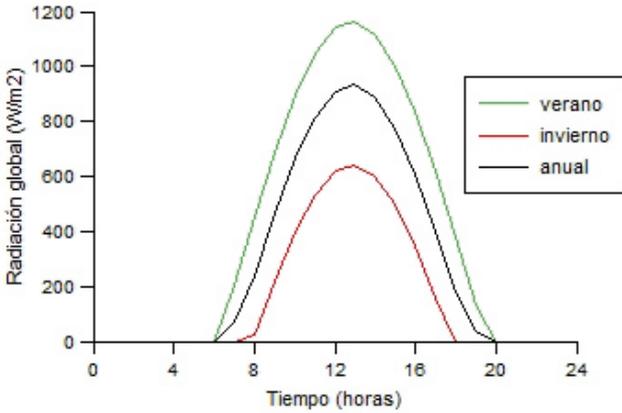


Figura 2. Ciclo diario promedio de la radiación solar incidente en el valle del Elqui, Región de Coquimbo. Se muestra el promedio anual (negro), en verano (verde) y en invierno (rojo).

Existen actualmente distintos tipos de paneles FV con diferentes grados de eficiencia. Cerca del 90% de los paneles FV disponibles en el mercado se basan en el uso de alguna variación del silicio, con distinto grado de pureza. Mientras más puro sea el silicio y mejor alineadas estén sus moléculas, mayor será su eficiencia.

Las celdas FV pueden dividirse en dos grandes grupos: cristalinos y de capa fina [14]. Entre los cristalinos distinguimos:

i. *Celda monocristalina*: Se reconoce por su forma circular o hexagonal. Está compuesta de secciones de un único cristal de silicio, que se fabrica usando el método de Czochralski [14]. La eficiencia de este tipo de celdas es superior a un 15%, alcanzando en algunos casos valores de hasta un 21%. Tienen la ventaja de tener la mayor vida útil de todos los tipos de celdas (sobre los 25 años), pero funcionan mejor en condiciones de poca radiación. Dentro de sus desventajas está el hecho de que son más caros, además de que al cubrirse parte de un panel compuesto por celdas monocristalinas por sombra o nieve, el circuito entero puede averiarse.

ii. *Celda policristalina*: Para su fabricación el silicio en bruto se funde y se vierte en un molde, el cual se deja enfriar para luego cortarlo en láminas cuadradas. Se distingue por su color azulado y su eficiencia

fluctúa entre un 13% y un 16%. Por la forma más simple de fabricación, los paneles policristalinos tienen la ventaja de ser más baratos que los monocristalinos. La menor eficiencia puede compensarse aumentando el número de paneles lo cual, en general, no es problema, a no ser que haya limitación de espacio disponible.

La eficiencia de los paneles mono y policristalinos disminuye con el aumento de la temperatura. Sin embargo, este efecto es menor en el caso de los policristalinos que en los monocristalinos.

Paneles FV de capa fina: Están compuestos de varias capas de material FV depositados sobre una base. Dependiendo del material empleado, podemos encontrar paneles de capa fina de silicio amorfo (a-Si), Telururo de cadmio (CdTe), cobre, indio, galio y selenio, e incluso células FV fabricadas con material orgánico (OPC). Los paneles de capa fina alcanzan eficiencias entre un 7% y un 13%. Tienen la gran ventaja de que su rendimiento no se ve afectado por las altas temperaturas. Sin embargo, tienen la desventaja de que tienden a degradarse más rápido. Mientras que la vida útil de los paneles cristalinos puede llegar hasta 40 años, los de capa fina llegan sólo a los 12 años.

Los paneles de capa fina son más fáciles de fabricar, y por ende son más baratos que los cristalinos, por lo que tienen mucha demanda especialmente para uso doméstico. Como mencionado anteriormente, la menor eficiencia de estos paneles puede ser compensada con un mayor número de éstos, lo cual en general es factible si no hay limitación de espacio. El hecho de que sean flexibles les da la ventaja adicional de que pueden adaptarse a distintos tipos de superficie.

2.2.2. Energía eólica

La energía eólica es la energía cinética o de movimiento del viento. Debe su nombre a *Eolo*, nombre del dios de los vientos en la mitología greco-romana.

¿Cómo se produce el viento?

El viento es el movimiento de las masas de aire sobre la superficie de la tierra. El aire, por el hecho de tener masa, está sujeto a diversas fuerzas, que pueden ser fuerzas reales o fuerzas ficticias [8].

Las fuerzas reales son i) la fuerza de gravedad, que es la fuerza que ejerce la tierra sobre el aire, y que provoca que la densidad del aire y la presión disminuyan con la altura, ii) el gradiente (diferencia) de presión entre dos puntos, que empuja a las masas de aire de zonas de mayor a zonas de menor presión y, iii) fuerzas disipativas o de roce, que son la causa, por ejemplo, de que el viento se anule en la superficie terrestre.

Las fuerzas ficticias o fuerzas aparentes son aquellas que aparecen por el hecho de que la atmósfera es observada desde la tierra, la cual está rotando permanentemente sobre su eje. Un observador situado sobre la tierra verá que el aire siente una fuerza, conocida como *Fuerza de Coriolis*, cuyo efecto es cambiar la dirección del viento. Si una parcela o quantum de aire se mueve de Oeste a Este, la fuerza de Coriolis hará que se desvíe hacia el norte en el hemisferio Sur, y hacia el sur en el hemisferio Norte.

A nivel cercano a la superficie el factor más importante en la producción de viento es el calentamiento diferencial de la superficie terrestre, llamado *viento térmico*. Un ejemplo de viento de esta naturaleza es la circulación Mar-Tierra: Durante el día el mar se calienta más lento que la superficie de la tierra, lo que se traduce en una diferencia de temperatura entre el aire sobre el mar y el aire sobre la tierra. El aire frío es más denso que el aire caliente, que se traduce en una mayor presión, lo que empuja a las masas de aire desde el mar hacia el interior. Durante la noche el efecto es el contrario y se genera un viento hacia el mar [8].

La rapidez y dirección del viento cerca de la superficie es afectada de manera importante por los accidentes geográficos. La figura 3 muestra el campo de viento medio en el periodo 1995 – 2006, calculado con el modelo KAMM (Karlsruhe Atmospheric Mesoscale Model) a las 14:00 en la parte central de la Región de Coquimbo. La figura incluye la Reserva Nacional Fray Jorge en el valle del Limarí [16].

Más información sobre el modelo KAMM puede encontrarse en [16] y [17], y bibliografía referida en estos artículos.

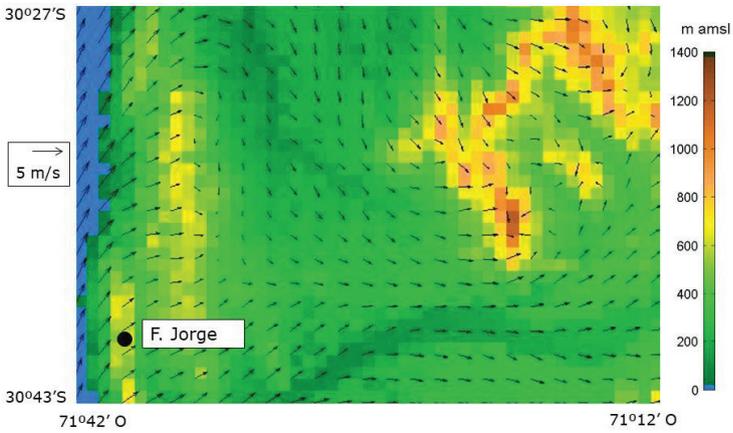


Figura 3. Campo de viento medio superficial en el periodo 1990 – 2005, en la zona central de la Región de Coquimbo. Los colores indican la topografía de acuerdo a la escala mostrada al costado derecho de la figura. La magnitud de las flechas indica la rapidez del viento (escala al lado izquierdo), y la dirección de las flechas indica la dirección del viento.

La energía cinética del viento puede ser usada para generar electricidad. El principio de funcionamiento de las turbinas que generan energía eléctrica, en su principio básico, es similar a los antiguos molinos de viento: el flujo de viento, al incidir sobre una turbina, hace girar las aspas. La diferencia es que, en este caso, la turbina genera electricidad por medio de la Ley de Faraday, de manera similar a una central termoeléctrica.

La primera turbina eólica para generar electricidad fue construida en el año 1887 en Escocia por el Profesor James Bluth del Anderson's College, Glasgow. Se trata de una turbina de 10 m de altura que se usaba para cargar baterías.

Potencial eólico

El potencial eólico P_v se mide en W/m^2 y se define como el flujo de aire o energía cinética del viento por unidad de tiempo (potencia) y unidad de área de una masa de aire que se mueve con rapidez v .

Se satisface:

$$P_v = \frac{1}{2} \times \rho \times v^3 \quad (\text{W/m}^2) \quad (1)$$

donde ρ (kg/m^3) es la densidad del aire. De acuerdo a (1), la máxima potencia que puede generar una turbina corresponde al caso en que toda la potencia del viento se transforma en electricidad, y está dada por

$$P = \frac{1}{2} \times \rho \times v^3 \times A \quad (\text{W}) \quad (2)$$

siendo A el área barrida por las aspas. En el caso de una turbina de eje horizontal, la superficie que enfrenta al viento corresponde al área de un círculo de radio L, con L la longitud de las aspas ($A = \pi L^2$).

La densidad del aire, que depende de la presión y la temperatura [8], disminuye con la altura por lo que, de acuerdo a (2), a igual condición de viento una turbina rendirá más a nivel del mar que en la cordillera. Como el potencial eólico depende del cubo de la rapidez del viento, si v aumenta al doble el potencial eólico disponible aumentará en un factor 8. Asimismo, variaciones de un 10% de v implican una variación del 30% del potencial eólico disponible, lo que muestra la sensibilidad de la posible generación de energía a partir de la energía eólica, por lo que antes de instalar una turbina es importante monitorear el viento.

Para estimar cuanto podría generar una turbina, supongamos que instalamos una turbina de 1 m^2 de área (aspas de 56 cm), a nivel del mar. Considerando que un kg de aire pesa 1.2 kg ($\rho = 1.2 \text{ kg/m}^3$), si el viento es de 10 m/s, de acuerdo a (2) el rendimiento máximo de la turbina será de 600 W.

La potencia máxima generada por una turbina mostrada en la ecuación (2) corresponde al caso de una turbina con eficiencia de un 100%, lo que no ocurre en la realidad. En efecto, las leyes de la física imponen una máxima eficiencia asociada a la turbina. Este límite, aparece por la ley de conservación de la energía, por lo siguiente:

El aire, al pasar por la turbina, disminuye su velocidad. Si toda la energía cinética del viento se transforma en electricidad, entonces, por conservación de energía, la rapidez del viento al otro lado de la turbina sería nula, lo cual significa que el viento se quedaría en el rotor, lo que tampoco es posible, ya que no permitiría la entrada de un nuevo flujo de

aire. Este efecto se conoce como ley *de Betz*, e indica que la razón entre la energía eléctrica que puede generar una turbina y la energía cinética del flujo de aire incidente es a lo más $16/27$, lo que equivale a decir que la eficiencia máxima es 59% [18].

La potencia que genera una turbina es, en general, menor que la indicada por la ley de Betz. Cada turbina tiene asociada una *curva de manufactura* o *curva de potencia* que es entregada por el fabricante, y que indica la potencia que genera la turbina en función del viento.

Normalmente, una turbina comienza a generar energía para una rapidez umbral u_u , a partir de la cual la potencia generada crece hasta alcanzar la rapidez nominal u_n , valor en el cual se alcanza la PN. Para intensidades del viento mayor que u_n , la potencia se mantiene constante hasta alcanzar la rapidez de corte u_c en donde la turbina se detiene. En el rango comprendido entre u_u y u_n la relación entre la potencia generada y la rapidez del viento siguen una tendencia similar a la del potencial eólico, es decir, crece con v^3 .

Un ejemplo de curva de manufactura se muestra en la figura 4, que corresponde a la turbina V90 que tiene una PN de 2 MW, de la empresa danesa Vestas. En este caso, la velocidad umbral, nominal y de corte es 4 m/s, 13 m/s y 25 m/s, respectivamente.

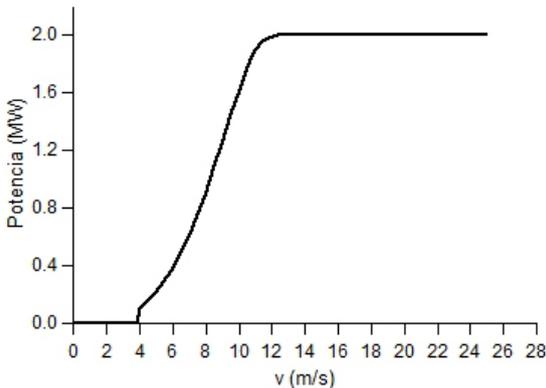


Figura 4. Curva de potencia de la turbina V90. Fuente: Vestas, elaboración propia.

La curva de manufactura representa el rendimiento de la turbina en función del viento, la que depende de factores relacionados con los materiales que la componen y otros factores de carácter tecnológico, por lo que es propia de cada turbina. Actualmente existen turbinas con rapidez umbral de 1 m/s, las cuales son apropiadas para lugares en donde la rapidez del viento es baja.

Por lo anterior, antes de decidir qué turbina es la más apropiada para ser instalada en un lugar, es recomendable monitorear el viento por un periodo lo suficientemente largo. El mínimo tiempo es un año, pues permite conocer las variaciones estacionales del viento. Sin embargo, como el viento presenta variaciones interanuales, se recomienda medir durante un periodo mayor (algunos años).

Realizar un monitoreo del viento implica adquirir una estación meteorológica y almacenar los registros para posteriormente hacer un análisis estadístico que permita estimar la energía que se generaría con distintos tipos de tecnologías, lo que tiene un costo, tanto monetario como de tiempo. Si no existen datos de viento y si la turbina que se desea instalar es para satisfacer necesidades de energía a baja escala -por ejemplo, para fines domésticos- el costo de monitoreo puede ser comparable al costo de la turbina. En estos casos, muchas veces conviene evaluar la intensidad del viento usando información basada en la experiencia de los lugareños. Es importante recalcar que, en lugares de topografía compleja, usar los datos de una estación meteorológica cercana no siempre es una buena idea. Para analizar la validez de estos datos en el sitio de interés es conveniente tomar en cuenta los accidentes topográficos existentes entre ambos sitios. Para entender el rango de validez de una estación meteorológica se sugiere mirar la referencia [19], que analiza la representatividad de los datos de temperatura medidos en distintas estaciones en el valle del Limarí.

Un criterio para estimar el viento a partir de observaciones es la escala de Beaufort. Está basada en el efecto del viento sobre el comportamiento del mar, en distintos rangos de rapidez, y se usa normalmente para fines náuticos. La Tabla 1 muestra esta escala y sus efectos sobre la tierra.

Tabla 1. Escala de Beaufort

INTENSIDAD DE VIENTO

Categoría	Descripción	m/s	km/h	Efectos
0	calma	0 a 1.5	0 a 5	Humo sube recto
1	brisa muy débil	1.5 a 3	6 a 11	Humo se mueve débil
2	brisa débil	3 a 5	12 a 19	Las hojas se agitan, se siente en la cara.
3	brisa moderada	5 a 8	20 a 28	Ramas pequeñas se mueven
4	brisa fuerte	8 a 10	29 a 38	Se eleva polvo. Se mueven árboles pequeños.
5	brisa muy fuerte	10 a 14	39 a 49	Se mueven las ramas grandes. Cuesta abrir el paraguas.
6	viento fuerte	14 a 17	50 a 61	Los árboles se inclinan
7	temporal	17 a 21	62 a 74	Ramas delgadas se quiebran. No se puede andar contra el viento
8	temporal fuerte	21 a 24	75 a 88	Se levantan tejas y a veces techos completos
9	tormenta	24 a 33	89 - 117	Caen árboles
10	huracán	>33	>118	Catástrofe

2.2.3. Energía hidroeléctrica

Como las antiguas ruedas de agua, las centrales hidroeléctricas usan el flujo de agua (caudal) para generar electricidad. El principio de funcionamiento es similar al de una turbina eólica, con la diferencia que se usa como fuente de energía el flujo de agua (por ejemplo, caudal de un río) en vez del viento. Para turbinas hídricas de eje horizontal, las ecuaciones (1) y (2) son también válidas, con la diferencia que en este caso ρ es la densidad del agua.

La densidad del agua es $1,000 \text{ kg/m}^3$, es decir, el agua es 1,000 veces más pesada que el aire. En otras palabras, para igual velocidad el caudal de agua tiene 1,000 más potencia por unidad de área que el aire, por lo que el tamaño de las turbinas eólicas es considerablemente mayor que las turbinas de una central hídrica.

Como en el caso de la energía solar y eólica, la energía hidroeléctrica es una energía limpia y, salvo en la etapa de construcción, no hay emisiones de GEI a la atmósfera. Sin embargo, la instalación de grandes centrales requiere la construcción de represas de gran envergadura, produciendo un impacto importante sobre el ecosistema. No sólo se inundan grandes extensiones de terreno forzando en ocasiones a los habitantes a emigrar del lugar, sino también es necesario interrumpir el curso natural de los ríos, lo cual trae consecuencias sobre los peces y otros organismos acuáticos. Por lo anterior, a pesar de la abundancia de este recurso en muchas partes del mundo, su uso no es masivo y sólo provee cerca del 2.5% de la necesidad energética mundial, y solo el 17% de la energía eléctrica proviene de esta fuente [4].

El impacto ecológico y social que trae consigo la instalación de represas causa que muchos proyectos de este tipo tengan que luchar contra la oposición de los lugareños. En Chile, un ejemplo emblemático es el caso de Hydroaysén presentado en el año 2007, y que generaría una potencia de alrededor de 3 GW proveniente de una fuente limpia. La oposición fue tal, que el proyecto fue abandonado el año 2017.

No obstante, lo anterior, en algunos países las centrales hidroeléctricas son la fuente primordial de energía. Este es el caso de Noruega en donde prácticamente el 100% de su energía proviene de esta fuente, seguido de Brasil e Islandia con cerca de un 80%.

La situación es distinta en el caso de las centrales hídricas de pa-

sada, que son en general de menor potencia y que usan el caudal ya existente para generar energía, produciendo un impacto mucho menor sobre el ecosistema.

2.2.4. Energía de biomasa o bioenergía

El concepto de biomasa se refiere a organismos capaces de realizar el proceso de fotosíntesis, que es el proceso mediante el cual las plantas y también algunas bacterias son capaces de transformar la luz solar en glucosa a partir de CO_2 y agua utilizando clorofila, pigmento de color verde. En este proceso se genera como residuo oxígeno molecular (O_2), uno de los elementos más importantes para la sobrevivencia del ser humano y la vida animal en general.

El uso de la biomasa como fuente de energía es probablemente el logro más antiguo de la humanidad. Ya en el paleolítico hace medio millón de años, con el control del fuego, la quema de material orgánico era la fuente de energía más usada para la cocción de alimentos y otros usos.

La biomasa cubre actualmente cerca de un 14% de las necesidades energéticas mundiales. Su uso es masivo principalmente en países en vías de desarrollo, que corresponde aproximadamente a un tercio de la población mundial, los cuales dependen de la leña, carbón vegetal y estiércol para su subsistencia.

El potencial de generación de energía a partir de la biomasa es enorme, tanto desde el punto de vista técnico como económico. Sin embargo, es interesante considerar las consecuencias. El uso masivo de la leña, por ejemplo, conduce a la devastación de grandes superficies de terreno produciendo erosión muchas veces de carácter irreversible. Por lo tanto, si su explotación no es controlada y no se replanta lo que se cosecha, su carácter de reserva de energía a largo plazo, y por ende su carácter de recurso renovable, es dudosa.

Existe una amplia gama de productos secundarios a partir de la biomasa [20]:

- i. Biogas.* Es una mezcla compuesta principalmente de metano (CH_4) y CO_2 . Se genera en la naturaleza por la biodegradación de materia orgánica en ambiente anaeróbico (ausencia de oxígeno),

mediante la acción de microorganismos. Se le conoce también como *gas de los pantanos*, pues estos ecosistemas son propicios para la formación de biogas. Es importante mencionar que, a pesar de que tanto el CH_4 como CO_2 que participan en el proceso, son gases de efecto invernadero (GEI), ellos han sido previamente absorbidos desde la atmósfera en el proceso de fotosíntesis, por lo que el balance neto en cuanto a la emisión de gases a la atmósfera es nulo.

- ii. *Bioetanol*. Puede producirse de manera económica en lugares en donde existe alta radiación solar. La generación de bioetanol es en su esencia similar al proceso de producción de bebidas alcohólicas destiladas: materia orgánica con alto contenido de azúcar es transformada por medio de fermentación anaeróbica en alcohol etílico y CO_2 . Posteriormente, por medio de destilación se aumenta la concentración de alcohol. Este proceso es necesario debido a que, para que el bioetanol pueda ser usado como combustible, su concentración debe ser mayor al 99.5%. Brasil es uno de los países con mayor producción de bioetanol.
- iii. *Biodiesel*. Se produce a partir de aceites vegetales, cuyo origen varía dependiendo del lugar. En Europa se genera principalmente a partir de raps, cuyas semillas contienen cerca de un 40% de aceite, en Estados Unidos se usa la colza y soja, mientras que en Asia, el biodiesel se genera a partir de aceite de palma y la jatrofa. Como en el caso del diésel normal, el biodiesel tiene la desventaja de que en el proceso de combustión se generan partículas de hollín y otros gases con efectos negativos sobre el medio ambiente.
- iv. *Combustible BtL (biomass to liquid)*. Se produce por la descomposición termoquímica, seguido por la producción de hidrocarburos líquidos a partir de gas de síntesis, conocido como proceso *Fischer-Tropsch*. A diferencia del bioetanol y el biodiesel, el procesamiento termoquímico de la materia orgánica puede convertir el 100% de la materia prima en combustibles y gases. El combustible resultante no contiene azufre ni otros aromatizantes, lo que hace que la combustión sea limpia. Contrariamente al biodiesel, el BtL puede ser usado en un motor normal, y no es necesario hacer cambios en su diseño.

- v. *Hidrógeno*. Se puede obtener a partir de la biomasa a través de dos procesos: (i) pirólisis de biomasa y fermentación, y posterior reformación del metanol; (ii) a través de microorganismos que, en presencia de luz solar, son capaces de transformar carbohidratos y agua en hidrógeno y otros compuestos orgánicos.

2.4. Geotermia

La geotermia usa la diferencia de temperatura entre dos puntos a distinta profundidad en el suelo que, según las leyes de la termodinámica, puede ser transformada en alguna forma de trabajo. En Europa la temperatura de la tierra aumenta con la profundidad a una tasa que fluctúa entre los 2.5°C y 3°C por cada 100 metros.

En el núcleo de la tierra se alcanzan temperaturas cercanas a los 6,000°C; incluso en la parte superior del manto terrestre, la temperatura es todavía muy alta con valores que bordean los 1,200°C.

Temperaturas similares a las del manto terrestre se han observado en algunos volcanes en erupción en Chile, como es el caso del volcán Villarrica, donde después de la erupción del 3 de marzo del 2015, un sobrevuelo permitió observar que unos días después de la erupción la temperatura de la lava era de unos 1,000°C.

Cerca de un tercio del calor que sube de las profundidades de la tierra a la superficie proviene de su núcleo. Los dos tercios restantes son consecuencia del decaimiento de elementos radioactivos naturales como el uranio (U) y el torio (Th), que se encuentra en el interior de la corteza y en el manto terrestre. En estricto rigor, el interior de la tierra es un reactor natural de fisión nuclear, en donde la radioactividad no llega a la superficie pues es apantallada por kilómetros de capas rocosas.

Una central geotérmica se ubica en un campo geotérmico en el cual el gradiente de temperatura en el subsuelo es mayor que el usual. Normalmente la fuente de energía es un acuífero subterráneo confinado que le permite mantener el calor, el cual es conducido hacia la superficie a través de pozos geotérmicos por donde se extrae el vapor el cual, de manera similar a las centrales térmicas, se utiliza para la generación de electricidad.

La energía geotérmica puede utilizarse también directamente como energía térmica. En este caso se usan cañerías por las cuales circu-

la un fluido que, por intercambio de calor, permite extraer el calor de la tierra.

Chile es pionero en Sudamérica en instalar una planta geotérmica para generar electricidad. La primera central de este tipo fue inaugurada en septiembre del 2017, y está ubicada en el Cerro Pabellón a 4,500 m de altitud, en la Región de Antofagasta. La planta, de propiedad de ENEL y ENAP, tiene una PN de 48 MW, y se espera que provea unos 340 GWh al año, equivalente a la demanda energética de 165 mil familias.

3

SITUACIÓN ENERGÉTICA. CONTEXTO MUNDIAL

La demanda energética a nivel global aumentó de manera considerable desde la revolución industrial iniciada en Gran Bretaña en la segunda mitad del siglo XVIII, que se extendió unas décadas más tarde a gran parte de Europa Occidental y Estados Unidos.

Hasta antes de la revolución industrial, el hombre había usado herramientas que necesitaban sólo de su fuerza muscular para emplearlas. El desarrollo de la tecnología experimentado a partir de este hito, tan trascendente en su historia, considera el uso de máquinas o instrumentos que requieren de una fuente de energía distinta para generar un trabajo, por lo que representa una línea divisora entre dos formas de generar bienes.

En esta sección se analiza la situación energética a nivel mundial y la participación de las Energías Renovables como fuente de energía en este contexto. Para esto, es necesario presentar al lector los conceptos de energía primaria y secundaria.

Se entiende por energía primaria aquella que es obtenida directamente desde fuentes naturales sin procesamiento previo, sean estas renovables o no. Algunos ejemplos son el carbón mineral, petróleo crudo, gas natural, viento, radiación solar, leña, uranio, caudal de los ríos, entre otros.

Las energías secundarias son aquellas fuentes de energía que son obtenidas a partir de las fuentes primarias, como por ejemplo la electricidad, gasolina, queroseno, petróleo diésel, carbón vegetal, carbón coque, etc.

Como ilustración, la gasolina o parafina es generada a partir del petróleo crudo, a través de un proceso de destilación. En el caso de la electricidad, puede ser generada tanto a partir de energía primaria usando, por ejemplo, la energía solar o el viento, como también desde fuentes secundarias como carbón coque o petróleo diésel.

La bioenergía pertenece a una gran categoría que incluye fuentes primarias y secundarias. En el caso de la biomasa, la calificación es algo compleja, pues, a diferencia del carbón u otros combustibles fósiles, sólo

una pequeña fracción termina en la forma de bioenergía. La leña, por ejemplo, es una fuente primaria de energía, tanto si se usa para producir carbón vegetal, como si se quema para generar directamente energía.

A principios del siglo XIX el 100% de la energía que se consumía era energía primaria, con el 95% proveniente de fuentes renovables principalmente de centrales hidroeléctricas. La primera central hidroeléctrica fue construida en el año 1880 en Gran Bretaña, impulsada por el desarrollo del generador eléctrico. Sin embargo, debido al avance tecnológico experimentado desde entonces, la necesidad de usar combustibles fósiles para proveer de energía a las máquinas aumentó de manera considerable, y a principios del siglo XX, los recursos renovables solo contribuían a satisfacer el 16% del total de la demanda energética [21].

Durante la segunda guerra mundial (1939 - 1945) e impulsada por esta, una nueva fuente de energía entra al mercado: la energía nuclear. Desde entonces, los reactores de fisión nuclear han sido una fuente de energía importante para la generación de energía. En el año 2011 existían 442 reactores nucleares operativos que generaban energía eléctrica distribuidos en 29 países, siendo Estados Unidos, con 104 reactores, el líder mundial en el uso de este tipo de energía [22]. Sin embargo, por el accidente ocurrido de Chernobyl (Prípiat, actual Ucrania) en abril del 2006 y en Fukushima (Japón) en marzo del 2011, sumado a los problemas asociados al manejo de residuos generados por este tipo de tecnología (ver sección 2.1.2), el auge de las centrales nucleares ha ido decayendo.

Durante el siglo XX, los combustibles fósiles se han mantenido como la principal fuente de energía, experimentando un aumento exponencial permanente incluso hasta el siglo XXI. El uso indiscriminado de estas fuentes lleva consigo un aumento importante de la concentración de CO_2 en la atmósfera que, después del vapor de agua, es el principal GEI, transformándose en un tema de preocupación a nivel mundial. A partir de principios de la década de 1960 la concentración de este elemento en la atmósfera ha ido creciendo de manera preocupante. A principios de la década de 1960 su valor era de 315 ppm (partes por millón), cifra que actualmente alcanza valores en torno e incluso superiores a los 400 ppm. Según la Organización Meteorológica Mundial (OMM), en el año 2016 la concentración de este elemento alcanzó los 403.3 ppm [23], superando la barrera de los 400 ppm observada por primera vez en el año 2005, año

en que se firmó el Acuerdo de París [24], y que ha promovido la celebración de otros acuerdos importantes tendientes a disminuir las emisiones.

La demanda de energía ha ido creciendo a tasas muy altas. Desde el año 1973 hasta el año 2009 el consumo de energía primaria prácticamente se duplicó, pasando de 6,111 a 12,150 Mtep (millones de toneladas equivalentes de petróleo).

La figura 5 despliega el cambio en la distribución del porcentaje de participación de los distintos tipos de energía primaria en el año 1973 y 2009. Como se observa en la figura, en este periodo la participación del petróleo disminuye de un 46% a un 32.8%; la energía nuclear aumenta de un 0.9% a un 5.8%, y las energías renovables – geotérmica, solar y eólica - aumentan de un 0.1% a un 0.8% [25].

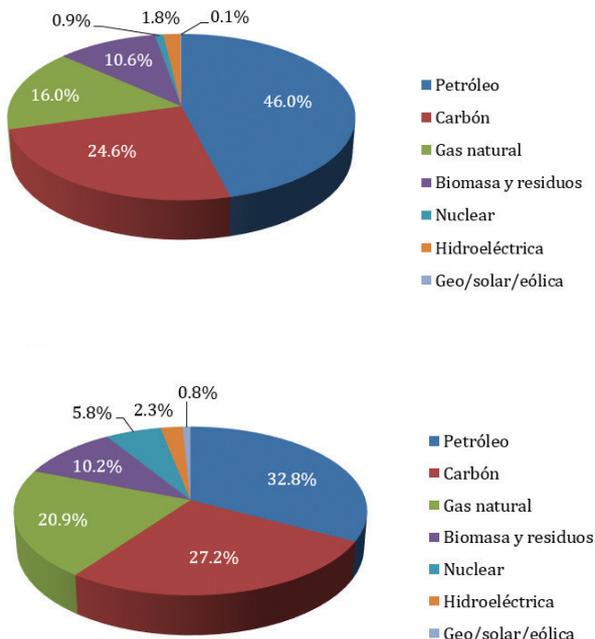


Figura 5. Distribución del uso de las energías primarias en el año 1973 (arriba) y en el año 2009 (abajo).

El aumento de la demanda de energía a nivel mundial, consecuencia principalmente por el desarrollo de China, que ocurre en paralelo a una disminución de descubrimientos de nuevos yacimientos de combustibles fósiles, provoca un aumento del costo de los combustibles. Adicionalmente a este factor de carácter netamente económico, las consecuencias negativas del empleo de estas fuentes en el medio ambiente empiezan a hacerse notorias.

El aumento de la concentración de CO₂ en la atmósfera, así como el cambio de temperatura promedio registrado en las últimas décadas, ha impulsado al ser humano a tomar distintas medidas tendientes a disminuir las emisiones.

Un paso importante en esta dirección lo constituye la convención marco de las Naciones Unidas (NU) llevado a cabo en mayo del 1992 en Nueva York, en la cual se reconoce que el Cambio Climático (CC) es un problema real. Se propone que los países industrializados estabilicen las emisiones de GEI, de modo tal que los ecosistemas puedan adaptarse a estos cambios de manera natural, sin perjudicar la producción de alimentos, ni el desarrollo económico a nivel mundial.

Posteriormente, en diciembre del 1997, se celebra el *Protocolo de Kioto*, que es un documento emanado de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), siendo uno de sus objetivos reducir las emisiones de seis GEI, entre los cuales está el CO₂. Una de las medidas es el llamado *bono de carbono* que representa el derecho a emitir una tonelada de dióxido de carbono. En lenguaje simple, esto consiste en considerar el derecho a emitir GEI como un bien canjeable a un precio establecido en el mercado.

Otro avance importante lo constituye el *Acuerdo de París*, que se celebró en la Conferencia de París en diciembre del 2015, siendo uno de sus objetivos mantener a largo plazo el aumento de la temperatura media mundial muy por debajo de los 2°C.

En paralelo y de manera independiente, los principales países industrializados -con excepción de Estados Unidos- han establecido acuerdos independientes con metas cuantificables de reducción de GEI. Un ejemplo interesante de mencionar es el caso de Alemania, que emprendió la transición energética o *Energiewende*. Se trata de cambiar la matriz energética a una basada en energías renovables, eficiencia energética y de-

sarrollo sostenible. El 30 de mayo del 2011, e incentivado por el accidente nuclear de Fukushima, Alemania anunció el plan de abandonar totalmente la energía nuclear en un plazo de 11 años. Esto incluía el cierre de seis reactores que habían sido apagados temporalmente dos meses antes, y otros dos que estaban fuera de funcionamiento por problemas técnicos.

En la figura 6 se ilustra la evolución del consumo de energía desde el año 1950 a la fecha, así como una proyección hasta el año 2050 [26].

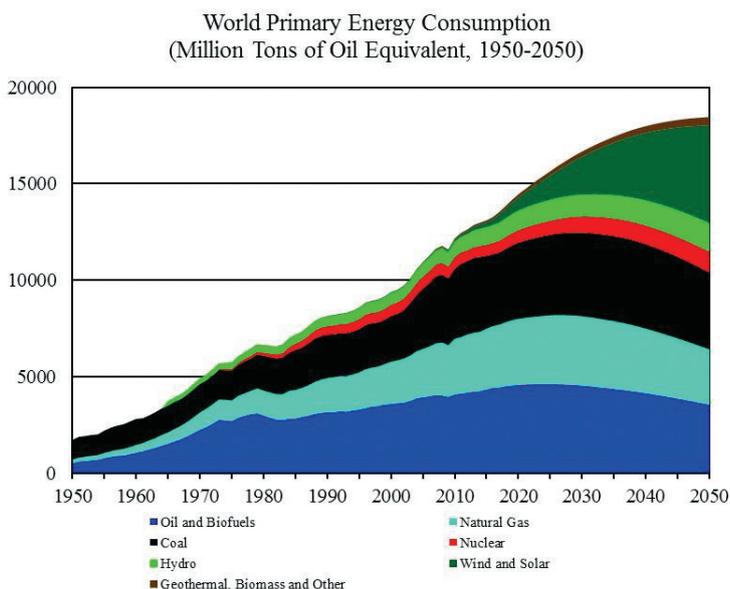


Figura 6. Evolución del consumo histórico de energía y proyecciones en el periodo 1950 – 2050, en Mtep. Fuente: [26].

Según la figura 6, la demanda de combustibles fósiles -petróleo, carbón y gas natural- experimentó un rápido crecimiento hasta mediados de la década de 1970, después de lo cual el crecimiento continuó hasta nuestros días, pero a una tasa más lenta. De acuerdo a las proyecciones mostradas en la figura, los combustibles fósiles alcanzarían el máximo consumo a mediados de la década del 2020, para luego comenzar a decaer. En cuanto a las energías renovables, las centrales solares y fotovoltaicas

aparecen a principios de este siglo, y se espera un crecimiento exponencial a partir de la próxima década, manteniéndose hasta el 2050 como la principal fuente de energía renovable.

Si bien es cierto que los acuerdos celebrados a nivel mundial favorecen la participación de las energías renovables en la matriz energética mundial, el impulso experimentado por estas fuentes limpias en las últimas décadas se debe principalmente al descenso de los costos nivelados sin subsidio, alcanzando valores similares e incluso en algunos casos inferiores al costo de las energías convencionales, lo que las han hecho competitivas en el mercado [27].

En cuanto al consumo actual de energía, en el año 2016 el consumo global fue de unos 17 Mtep, y su distribución por fuente de energía primaria se despliega en la figura 7 [28]. La figura muestra que la participación de las energías renovables en la distribución de energía primaria consumida es de un 3.2%.

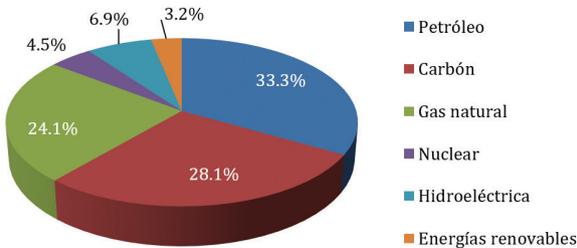


Figura 7. Distribución del consumo de energía primaria en el mundo en el año 2016.

Es importante mencionar que el aumento del consumo energético en el año 2016 fue de un 1% respecto al registrado en el año 2015, muy bajo en comparación con el aumento de alrededor de un 10% anual experimentado en los años anteriores. Adicionalmente, se ha observado que las emisiones de CO₂ en el año 2016 bajaron en un 2.7% respecto al año anterior.

4

SITUACIÓN ENERGÉTICA. CONTEXTO CHILENO

En el año 2016, la participación de las energías renovables en Chile era de un 10%, poniéndolo entre los cinco países con mayor porcentaje de participación de ERNC en la matriz energética, y entre los 10 países con mayor porcentaje de inversión en energía limpia, en relación con el crecimiento económico [29]. Esta cifra es producto de una serie de medidas que se han ido tomando en el transcurso del tiempo para incentivar el uso de las energías renovables en el país.

4.1. Sistema eléctrico chileno

Hasta noviembre del año 2017, el sistema eléctrico estaba constituido por cuatro sistemas [30]:

- Sistema Interconectado del Norte Grande (SING), que abarca desde Arica hasta Taltal en la Región de Antofagasta.
- Sistema Interconectado Central (SIC): desde Taltal hasta la Isla grande de Chiloé. Es el sistema más importante, con un 93% de la generación a nivel nacional.
- Sistema eléctrico de Aysén (EDELAYSEN).
- Sistema eléctrico de Magallanes (EDEL MAG).

El SIC y el SING proveen cerca del 99% de la energía eléctrica generada en Chile, mientras que el 1% restante se reparten entre los sistemas eléctricos medianos EDELAYSEN y EDEL MAG [31].

En la figura 8 se muestra la evolución del porcentaje de la generación de energía de los sistemas SIC y SING en la última década.

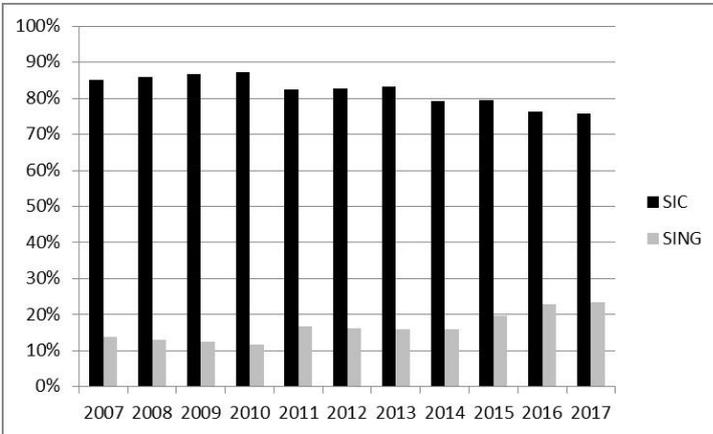


Figura 8. Evolución del porcentaje de la generación de energía en el SIC y SING en el periodo 2007-2017.

En noviembre del año 2017 se constituye el Sistema Eléctrico Nacional (SEN), que une el SING y el SIC creando un solo sistema desde Arica hasta Chiloé, con una capacidad conjunta instalada de 24 GW atendiendo una demanda máxima de 11 GW. El SEN comprende el conjunto de centrales generadoras, líneas de transporte, subestaciones eléctricas y líneas de distribución interconectadas entre sí, que permite generar, transportar y distribuir la energía eléctrica desde el punto de generación a los usuarios finales. La coordinación del SEN está a cargo del Coordinador Eléctrico Nacional (CEN) [30].

4.2. Políticas que incentivan la incorporación de las ERNC a la matriz energética chilena

Durante las dos últimas décadas, el Gobierno de Chile ha tomado medidas para incentivar la incorporación de las energías renovables en la matriz eléctrica nacional. La primera de ellas corresponde a la promulgación de leyes que se traducen en oportunidades para el desarrollo de pequeños proyectos de generación en base a las llamadas Energías Renovables No Convencionales (ERNC).

El artículo 22 de la ley 20,257 define las ERNC como aquellas centrales cuya fuente de energía primaria es una de las siguientes:

- energía solar
- energía eólica
- energía de la biomasa
- energía hidráulica con una PN inferior a 20 MW.
- energía geotérmica
- energía del mar

Para incentivar la participación de las ERNC en la matriz energética nacional, se dictaron las siguientes leyes:

Ley Corta I (Ley 19,940). Promulgada en el año 2004, establece lo siguiente:

- Una reducción del pago del peaje troncal a las centrales ERNC. Según esta ley, las centrales ERNC cuya potencia instalada es menor que 9 MW están exentas del pago, el cual aumenta linealmente hasta alcanzar un 100% para una central de 20 MW o mayor.
- Se obliga a las distribuidoras a conectar cualquier central con potencia menor a 9 MW.
- Las centrales menores a 9 MW tienen derecho a vender al Centro de Despacho de Carga (CDEC) al precio estabilizado (precio de nudo).

Ley Corta II (Ley 20,018). Es promulgada en el año 2005 y establece que aquellas empresas generadoras que tengan una capacidad instalada mayor que 200 MW, al menos un 5% del total de energía generada debe provenir de ERNC.

Es importante mencionar que la meta del 5% se ha cumplido en su globalidad en Chile a partir del año 2009. En los años posteriores, se han continuado incorporado distintas políticas y leyes tendientes a lograr que las ERNC se incorporen de manera efectiva a la matriz energética nacional.

En el año 2012 el Gobierno de Chile estableció la Estrategia Nacional de Energía (ENE) para el periodo 2012-2030, en donde se establecen seis pilares fundamentales que son:

- i. Crecimiento con EE
- ii. Despegue de las ERNC
- iii. Rol de las energías tradicionales (hídrico y térmico)
- iv. Nuevo enfoque en transmisión (Troncal, adicional y subtransmisión)
- v. Mercados eléctricos competitivos
- vi. Interconexión eléctrica regional

De los puntos anteriores, el pilar fundamental es la EE. En cuanto a la incorporación de las ERNC, se propone crear un nuevo esquema que facilite la conexión de éstas a los sistemas de transmisión, ya sea troncal, de subtransmisión u otro.

La ENE no sólo crea incentivos para aumentar la participación de las energías limpias en la matriz energética, sino que, dado que las ERNC no pueden satisfacer la demanda de energía en su totalidad, se le da gran importancia a las centrales hidroeléctricas y al carbón.

Entre los pasos que se siguieron para cumplir la ENE se destacan dos leyes:

Ley 20,571 o ley del Net-Metering. Promulgada en el año 2012, permite a particulares y pequeñas empresas a transformarse en pequeñas centrales generadoras, instalando en sus propiedades paneles fotovoltaicos, lo que les permite consumir lo que producen y vender el excedente a la red central.

Ley 20,698. Es anunciada en el año 2013 y establece que al año 2025 el 20% de la energía generada debe provenir de ERNC, propiciando con esto una mayor participación de las energías limpias en la matriz energética.

En diciembre de 2015 se publica la *Política Energética 2050 (PE 2050)*, que propone una visión del sector energético con vistas al año 2050, la cual es construida con la participación del sector público, la industria, la academia, la sociedad civil, las regiones y la ciudadanía en general. La *PE 2015* se proyecta como una política confiable, sostenible, inclusiva y competitiva. Sus pilares fundamentales son:

- i. Seguridad y calidad de suministro
- ii. Energía como motor de desarrollo

- iii. Energía compatible con el Medio Ambiente
- iv. Eficiencia y Educación Energética

Se plantean diez grandes metas al año 2050, dentro de las cuales mencionamos:

- i. Las emisiones de GEI deben ser coherentes, tanto con los límites definidos a nivel mundial como con la meta nacional de reducción, tendiendo hacia una economía baja en Carbono.
- ii. El 100% de las edificaciones deben construirse con estándares de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE)
- iii. El 100% de las principales categorías de los artefactos que se ofrecen en el mercado deben ser energéticamente eficientes
- iv. Al menos el 70% de la generación eléctrica nacional debe provenir de energías renovables.

Adicionalmente se proponen una serie de metas al 2035, que incluyen la participación de los distintos actores en los proyectos energéticos, siendo algunas de ellas:

- i. Los proyectos energéticos cuentan con mecanismos de asociatividad Comunidad – Empresa
- ii. En el 2035 al menos el 60% de la generación eléctrica nacional proviene de energías renovables
- iii. En el año 2030 Chile reduce las emisiones de GEI en un 30% con respecto al año 2007
- iv. El 100% de vehículos nuevos licitados para transporte público incluyen criterios de eficiencia energética

4.3. Participación de las ERNC en la matriz energética nacional

El crecimiento de Chile en el mercado de las ERNC se ve reflejado en las versiones del Climate Scope 2016 [29] y 2017 [32], elaborado por Bloomberg New Energy Finance y el Banco Interamericano de Desarrollo (BID). En la versión del año 2016 Chile aparece como el segundo país más competitivo en el mercado de las ERNC, siendo superado solamente por China. En la versión del año 2017 se reconoce a Chile en el primer lugar en inversión de ERNC, y en la lucha contra el CC en la Región de América Latina y el Caribe.

La primera central de ERNC instalada en Chile fue el parque eólico Alto Bahuales ubicado en la Región de Aysen. Este parque, instalado en el año 2001, consiste de tres turbinas, tiene una PN de 1.8 MW y entrega energía eléctrica a la ciudad de Coyhaique [33].

Posteriormente, en el año 2007 se inaugura en la Comuna de Canela, Región de Coquimbo, el parque Canela que es el primer parque eólico conectado al SIC. El parque, en ese entonces de propiedad de EN-DESA, consta de once aerogeneradores de 1.65 MW cada uno, tiene una PN total de 18.5 MW y una generación anual esperada de 46 GWh.

La Región de Coquimbo ha sido por años la región con mayor potencia eólica instalada en Chile. La figura 9 muestra la potencia eólica instalada en el país y en la Región de Coquimbo, desde el año 2000 a la fecha.

En el año 2015, la potencia eólica instalada en la Región de Coquimbo era de 604.6 MW, correspondiente a un 67% de la potencia total instalada en Chile. A pesar de que desde entonces no han entrado nuevos parques eólicos en operación en la región, en el 2017 la región tiene el 46% de la potencia eólica instalada en el país. Recientemente (agosto 2018), entró en operación el parque eólico Punta Sierra, ubicado en las cercanías de la ciudad de Ovalle en la provincia del Limarí. Este parque, de propiedad de Pacific Hydro, consta de 32 turbinas y tiene una capacidad instalada de 82 MW.

La participación de las ERNC en la matriz energética nacional ha ido ganando en importancia en la última década. En el año 2009 las

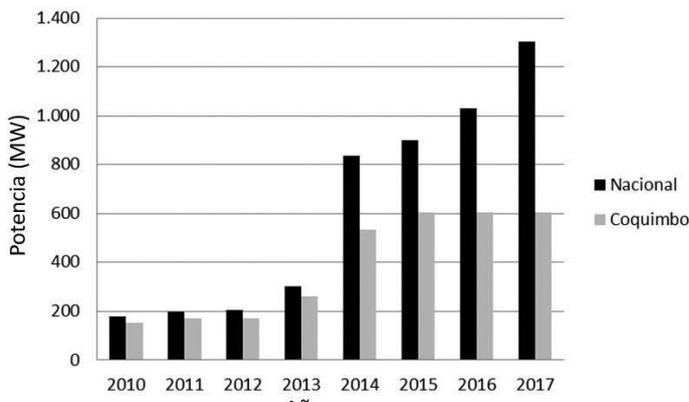


Figura 9. Potencia eólica instalada en Chile y en la Región de Coquimbo Fuente: CNE, CER, CEN.

ERNC -eólica y biomasa- representaban un 0.06% de la energía total generada, cifra que a fines del 2017 aumentó a un 18%, con una potencia total instalada de 4.1 GW [28]. Esta cifra incluye la primera central geotérmica instalada en Cerro Pabellón en la Región de Antofagasta, y que tiene una PN de 24 MW.

La figura 10 muestra la participación de las distintas fuentes de ERNC en el periodo 2010-2017. Es importante mencionar que dentro de las centrales mini-hídricas mostradas en esta figura, sólo están consideradas aquellas centrales de pasada cuya potencia instalada es menor que 20 MW, que es la condición para ser consideradas en el grupo de ERNC.

Como puede observarse, la participación de la bioenergía y las centrales mini-hídricas no han experimentado un cambio significativo en la última década. Este no es el caso de la energía solar y eólica. La energía eólica ha ido creciendo de manera continua desde el año 2010, mientras que la solar FV se integra al sistema eléctrico recién en el año 2013, con una potencia nominal de 6.7 MW, la que ha ido aumentando exponencialmente desde entonces, superando incluso en participación a la energía eólica.

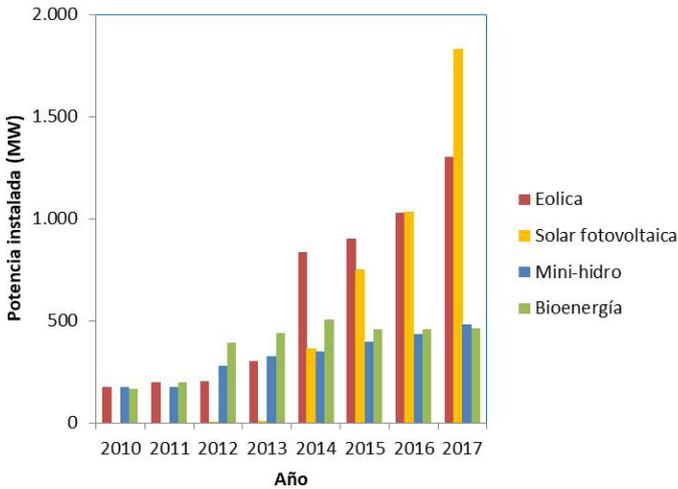


Figura 10. Participación de las ERNC en la matriz energética chilena en el periodo 2010-2017. Elaboración propia. Fuente: CNE, CEN, CER.

La primera planta solar FV instalada en Chile es la central Tambo Real, ubicada en la Región de Coquimbo. Actualmente, la planta FV de mayor capacidad es la central El Romero Solar ubicado en pleno desierto de Atacama. La central, de propiedad de ACCIONA, tiene una PN de 196 MW. A fines del año 2017, la PN de energía eólica y solar instalada en el SEN es de 1.3 GW y 1.8 GW, respectivamente. Actualmente el 100% de las centrales eléctricas en construcción son de fuentes renovables, lo que constituye un hito en la historia de la matriz energética del país.

En el ANEXO se despliega una lista de las centrales mini-hídricas, eólicas, solares, bioenergía y geotérmicas instaladas actualmente en Chile.

4.4. Potencial de recursos ERNC en Chile

Los recursos renovables no están distribuidos en forma homogénea sobre la tierra. Por lo tanto, si en un lugar particular se desea generar energía a partir de fuentes renovables, uno de los factores a considerar es qué recurso es más abundante en el área.

Chile tiene un gran potencial de ERNC, con características dis-

tintas a lo largo de su territorio. Así tenemos que el Desierto de Atacama es uno de los lugares con el mejor potencial de energía solar en Chile y en el mundo; el recurso hídrico está concentrado en la zona Centro - Sur del país, mientras que el recurso geotérmico está localizado principalmente en la región cordillerana.

En el caso del recurso eólico, por la topografía compleja que caracteriza nuestro país las características del viento, tanto en magnitud como en dirección, presentan importantes variaciones en distancias cortas [16].

Además de las variaciones en el espacio, el viento experimenta variaciones diarias e interanuales. Si se desea evaluar la factibilidad de instalar una turbina eólica en un sitio para generar energía eléctrica, es necesario conocer las características locales del viento, para lo cual se requiere monitorear las condiciones meteorológicas por un periodo de tiempo suficientemente largo.

Instalar una estación de monitoreo cuesta dinero y tiempo, por lo que es deseable, previamente al monitoreo, disponer de una herramienta que permita estimar las condiciones de viento en el lugar. El elegir un lugar no adecuado implica pérdidas económicas y de tiempo.

Los mapas de viento son representaciones gráficas de la distribución espacial de la rapidez del viento a una distancia fija sobre el suelo. Se generan usando herramientas de modelación atmosférica, que permiten calcular el comportamiento del viento y otras variables atmosféricas a partir de métodos numéricos, usando una infraestructura computacional adecuada. Para su validación es necesario disponer de unas pocas estaciones de monitoreo que permiten conocer la validez del modelo usado en el área particular de interés. En palabras sencillas, podemos decir que un modelo atmosférico permite espacializar los registros de estaciones meteorológicas locales.

En el año 2012, por encargo del Ministerio de Energía y la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ), el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile desarrolló el *Explorador eólico-solar* [34]. Esta herramienta genera mapas de viento y radiación solar georreferenciados a lo largo de todo Chile. La metodología, basada en modelación de atmosférica de mesoescala, describe las características meteorológicas promedio durante un año (2010), por lo que no están consideradas las variaciones interanuales.

Para evaluar el potencial eólico considerando las variaciones interanuales del viento, el Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas (CEAZA) en conjunto con la Universidad de Chile, ejecutó en el periodo 2007 – 2010 el proyecto FONDEF D05I10038 titulado “*Evaluación del recurso eólico en el Norte Chico de Chile para su aprovechamiento en la generación de energía eléctrica*”. El proyecto, liderado por Sonia Montecinos, evaluó las condiciones meteorológicas medias en las regiones de Coquimbo y Atacama en un periodo de 16 años (1990-2015). La metodología estaba basada en herramientas de modelación atmosférica, usando el modelo KAMM. El trabajo se hizo en colaboración con la Dra. Inge Bischoff-Gauss y el Dr. Norbert Kathoff del Karlsruhe Institute for Technology (KIT) en el marco del proyecto de Cooperación Internacional entre la Comisión Nacional de Ciencia y Tecnología (CONICYT) y el Ministerio Alemán de Capacitación e Investigación (BMBF), cód. 066-2017

La figura 11 muestra el mapa de viento de las regiones de Coquimbo y Atacama, que corresponde al valor medio de la intensidad del viento a 50 m sobre el nivel del suelo.

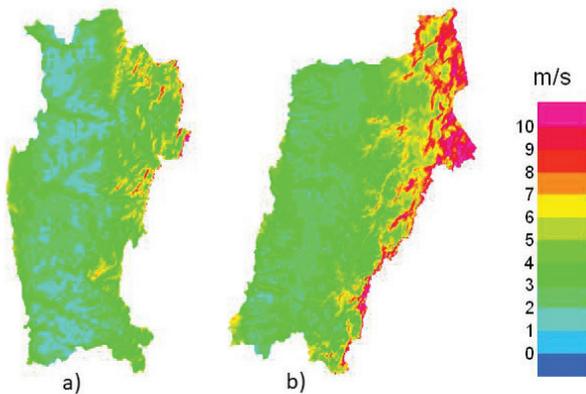


Figura 11. Mapa de viento en el Norte Chico de Chile de a) Región de Coquimbo y b) Región de Atacama, evaluado en el marco del proyecto FONDEF D05I10038. Los colores representan el valor medio del viento a 50 m sobre el nivel del suelo en el periodo 1990-2015, de acuerdo a la escala mostrada al costado derecho de la figura.

Un mapa de viento representa una herramienta muy útil pues permite identificar los sitios con buen potencial de viento, sin haber instalado una torre de monitoreo. Sin embargo, los mapas tienen también sus limitaciones. Una de ellas es la resolución espacial del modelo, que limita su validez especialmente en zonas de topografía compleja, como es el caso de las regiones de Coquimbo y Atacama. Por lo anterior, una vez identificado un lugar con características que lo hacen atractivo para la instalación de turbinas, es necesario hacer una evaluación exhaustiva del viento mediante una torre de monitoreo. Para conocer las variaciones interanuales del viento se recomienda realizar un monitoreo por un periodo de algunos años.

Para que un lugar sea apto para generar energía eléctrica a partir de alguna fuente de ERNC no es suficiente que el recurso -viento, sol, etc.- exista. En el análisis de factibilidad deben considerarse además otros criterios de carácter técnico, económico y de mercado.

El criterio técnico toma en cuenta las posibilidades del aprovechamiento del recurso de acuerdo a las tecnologías disponibles, restricciones territoriales y/o legales; el criterio económico está relacionado con factores como la competitividad de las ERNC respecto a otras fuentes de suministro; el criterio de mercado considera en su análisis la demanda de energía, disposición de posibles inversionistas, fuentes de financiamiento, marco regulatorio, etc.

En el año 2014 el Ministerio de Energía y la GIZ elaboraron un documento en el que se evalúa el potencial de energías renovables en base a todos los criterios mencionados [35]. De acuerdo a este estudio, entre Arica y Chiloé existiría un potencial de instalación de centrales ERNC – viento sol e hídrica - de cerca de 1,865 GW. Las mejores condiciones para instalar centrales eólicas están en Taltal en el Norte y Chiloé en la zona austral; en el caso de centrales solares, los mejores lugares se ubican en la Región de Antofagasta, y las centrales hídricas debieran instalarse en la Zona Central de Chile.

Esta información fue usada por las distintas regiones del país para elaborar planes energéticos que permitan hacer un ordenamiento territorial para la explotación de recursos naturales, en el marco de la PE 2015 y sus pilares de desarrollo descritos en la sección 4.2.

En el caso particular de la Región de Coquimbo, esta información

fue la base para elaborar el Plan Energético Regional (PER) Región de Coquimbo, diagnóstico y alternativas [36]. Uno de los productos de este estudio se muestra en la figura 12, que despliega los lugares factibles para la instalación de tecnologías que permitan explotar las distintas fuentes de ERNC.

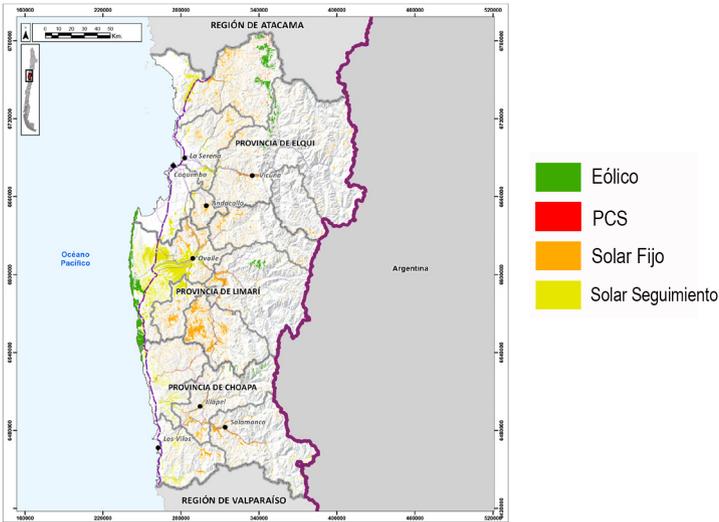


Figura 12. Mapa de lugares para instalación de centrales eólicas, plantas de concentración solar (PCS), solares fotovoltaicas con eje fijo y con seguimiento. Fuente: [36]

5

PRONÓSTICO DE GENERACIÓN DE ERNC

La producción de energía de cualquier planta de generación está sujeta a variaciones por distintos factores, normalmente de carácter técnico como mantenimiento o fallas en el sistema eléctrico. En el caso de las plantas que generan energía a partir de fuentes renovables, ellas experimentan variaciones adicionales debido a que funcionan en base a recursos naturales las que son, en general, de naturaleza variable.

En el caso de las centrales hidroeléctricas, tanto de embalse como de pasada, su variabilidad es debida principalmente a las variaciones interanuales de las precipitaciones, especialmente en forma de nieve en la cordillera, en donde se almacena el recurso hídrico. En el caso de las centrales eólicas y solares, cuya generación depende de variables como viento, radiación solar, temperatura, etc., están sujetas, no sólo a variaciones interanuales, sino también a variaciones durante el transcurso del día.

La energía proveniente de centrales fotovoltaicas depende principalmente de la radiación solar incidente, cuyo valor se ve disminuido por la presencia de nubes, como se ilustra en la figura 13. La figura despliega el ciclo diario de la radiación solar en el parque FV Luna ubicado en el valle del Elqui, Región de Coquimbo, en un día soleado (13 de mayo, 2016), y un día nublado (15 de mayo 2016). Puede observarse que cerca del mediodía, cuando el sol está más cerca del cenit, las nubes pueden disminuir hasta un 75% el valor de la radiación solar incidente.

El cambio experimentado por la radiación solar, especialmente si ocurre cerca del mediodía, genera un cambio importante y rápido en la generación de energía de un parque FV, lo que puede producir inestabilidades importantes en la red central.

Similarmente en el caso de las centrales eólicas, cambios en la rapidez de viento generan cambios en la energía generada, lo que debe ser manejado. Cuando la inyección de la energía eólica es menor que un 10%, el impacto en la red de los cambios de la energía generada por un parque eólico debido a cambios en el viento es manejable usando estrategias

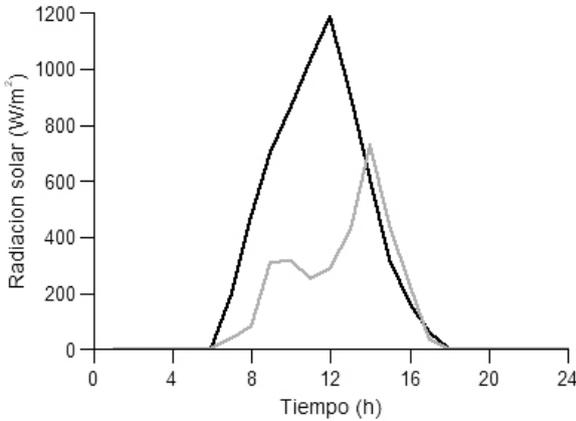


Figura 13. Ciclo diario de la radiación global los días 13 de mayo (negro) y 15 de mayo (gris), 2016. Elaboración propia basada en datos proporcionados por las empresas SCL Energía Activa e im2 Energía Solar.

históricas de operación. Cuando la participación es mayor, es necesario introducir nuevas técnicas de control [37].

En el caso de Chile y como se ha indicado, a fines del año 2017 el 18% de la energía generada a nivel país proviene de ERNC, 76% de la cual corresponde a centrales eólicas y solar FV, la cual, según el CEN [30], debiera ir aumentando en los próximos años. Cuanto mayor sea la participación de este tipo de energías, variaciones porcentuales pequeñas de la energía generada significan una variación importante en la cantidad de energía generada, factor que debe ser considerado en las variables de control. Según esta misma fuente, “la variabilidad e incertidumbre que enfrentan los operadores de red en un sistema eléctrico puede disminuir el beneficio de despachar energía de bajo costo como la eólica y solar, llevando incluso al ‘vertimiento’ de estas fuentes”.

Por lo anterior, la incorporación efectiva de las centrales ERNC a la matriz energética debe ir unida a la implementación de un buen sistema de pronóstico, que permita tomar medidas que compensen estas variaciones. Para esto, actualmente el CEN exige a las centrales eólicas y solares un pronóstico, tanto de las condiciones meteorológicas como de la energía generada.

Debido a que el pronóstico proporcionado actualmente por las centrales ERNC al CEN no tiene la calidad deseada, en el año 2016 el Ministerio de Energía en conjunto con la GIZ llamó a licitación para proveer pronósticos de energía eólica y solar durante un periodo de un año, la que fue adjudicada a la empresa norteamericana AVS Truepower.

5.1. Pronóstico de energía eólica

De manera simultánea e identificando la necesidad de obtener pronósticos de calidad, la Universidad de La Serena (ULS), en conjunto con la Universidad de Valparaíso (UV) ejecutó en el periodo 2015-2017 el proyecto FONDEF IDeA ID14I10016 “*Sistema de pronóstico de la energía generada por un parque eólico*”. El proyecto contó con el apoyo del Centro de Energía Solar e Investigación de Hidrógeno, Baden-Württemberg (ZSW), Alemania. La colaboración con el ZSW se hizo a través del proyecto de Cooperación Internacional CONICYT-BMBF (BMBF20140039) “*Predicción de un sistema optimizado con energías renovables en Chile*”.

El objetivo del proyecto FONDEF fue generar pronósticos de la energía generada por un parque eólico. Para elegir la metodología más adecuada para lograr este objetivo, es importante mencionar que la energía que genera un parque eólico no depende sólo de la rapidez del viento como se mostrara en la figura 4, sino que también depende de otros factores. Las mismas turbinas modifican el campo de viento causando una disminución de la rapidez del viento, además de generar turbulencias que afectan el rendimiento de las turbinas y, consecuentemente, la energía que produce el parque. Por lo anterior, la energía real generada en función de la rapidez del viento presenta dispersiones con respecto a la curva de manufactura de las turbinas, como se discutirá en la sección 5.1.2.

Por lo mencionado en el párrafo anterior, para obtener un buen pronóstico de la energía generada por un parque eólico, no es suficiente el hecho de tener un buen pronóstico de la rapidez del viento, sino que deben ser considerados factores como la turbulencia que, si bien puede hacerse numéricamente, es un proceso complicado y no siempre fácil de simular [38].

Una forma de tomar en cuenta todos los factores que afectan el

parque, sin hacer una modelación física de todos estos fenómenos, es usando Redes Neuronales Artificiales (RNA). Las RNA son algoritmos biológicos que permiten, mediante un proceso de entrenamiento, simular el comportamiento futuro de una variable respecto a otras variables a partir de información histórica.

Ejemplos de aplicaciones de RNA en Energías Renovables y en pronósticos meteorológicos pueden encontrarse en [39] y [40].

En el caso del proyecto FONDEF, lo que se desea pronosticar, es decir, la variable de interés, es la energía generada por un parque eólico, la cual depende de las condiciones meteorológicas, en especial de la rapidez del viento, que son variables que deben considerarse en la simulación.

La metodología usada consiste en entrenar una RNA que genere pronósticos de energía a partir de un pronóstico meteorológico. En otras palabras, se espera que la RNA aprenda, mediante el proceso de entrenamiento, cuánta energía genera el parque en función de los valores de viento pronosticados por un modelo meteorológico.

Para lograr este objetivo, las RNA son entrenadas con la siguiente información:

- i. Pronósticos meteorológicos históricos
- ii. Datos históricos de la energía generada por el parque
- iii. Datos meteorológicos históricos

Es importante mencionar que, para poder aplicar esta metodología, es necesario que la empresa dueña del parque provea la información necesaria para este propósito. Los resultados mostrados en esta sección están basados en información registrada en el parque eólico Totoral ubicado en la Región de Coquimbo (31°19' latitud Sur; 71° 36' longitud Oeste), puesta a disposición del proyecto por la empresa Latin American Power (LAP) de Nordwind.

5.1.1 Preparación de datos de entrada

5.1.1.1 Pronósticos meteorológicos

Para generar pronósticos meteorológicos históricos, se validó el modelo WRF (Weather Research and Forecasting Model) en la Región de Coquimbo. El modelo WRF fue desarrollado a partir del año 1990 en Estados Unidos para fines de investigación atmosférica y de pronóstico. El modelo resulta de un esfuerzo cooperativo entre el Centro Nacional de Investigación Atmosférica (NCAR), la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica, la Agencia del Tiempo de la Fuerza Aérea (AFWA), el Laboratorio de Investigación Naval, la Universidad de Oklahoma, y la Administración Federal de Aviación (FAA) [41].

Para fines de validación, se corrió el modelo WRF con tres diferentes configuraciones de la capa límite [42] por un periodo de dos años, eligiéndose posteriormente la configuración que mejor se ajusta a los datos experimentales. Las simulaciones fueron realizadas en la infraestructura computacional de la Universidad de Valparaíso, institución asociada al proyecto.

Los resultados del modelo se compararon con datos registrados en el parque eólico Totoral -rapidez del viento a 34 y 80 m de altura y temperatura- además de datos de estaciones de la red ceazamet [43] de propiedad del CEAZA. Se encuentra que las tres configuraciones sobreestiman la rapidez del viento, siendo la configuración QNSE (Quasi-Normal Scale Elimination) [44] la que mejor se ajusta a los resultados. Esta configuración se usará para los cálculos y análisis posteriores.

Es importante recalcar que la sobreestimación sistemática de la rapidez del viento calculada con el modelo WRF respecto a las observaciones, no es relevante para efectos de generar un buen pronóstico de energía. Como se explicó anteriormente, durante el proceso de entrenamiento, las RNA aprenden a reconocer la relación entre el valor *pronosticado* del viento y la energía generada.

No obstante, lo anterior, el pronóstico de viento es un producto de interés en sí mismo por lo que tener un buen pronóstico de esta variable es una meta deseable.

Para generar un buen pronóstico de viento, las RNA son también

una herramienta muy útil [45]. Esto puede verse en la figura 14, en donde se representa el ciclo diario promedio de la rapidez del viento a 80 m de altura en el parque eólico Totoral. La figura despliega los valores observados, simulados con el modelo WRF, y mejorados usando RNA. Como puede verse directamente de la figura, el uso de RNA permite acercar de manera considerable los resultados modelados a las observaciones. Se encuentra que la raíz del error cuadrático medio (RMSE por su sigla en inglés) entre el modelo WRF y las observaciones es 1.1 m/s, mientras que al aplicar RNA este valor decrece a 0.2 m/s.

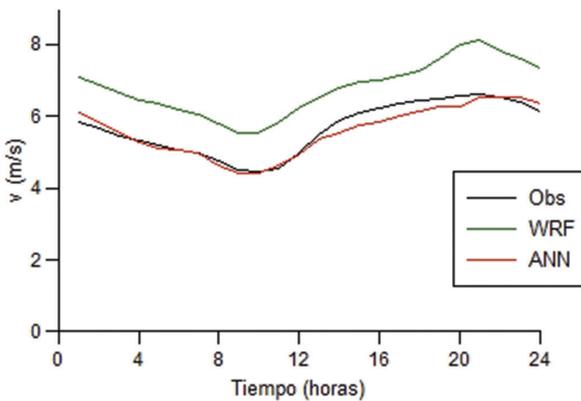


Figura 14. Ciclo diario promedio de la rapidez del viento a 80 m sobre el suelo en el parque eólico Totoral. Negro: observaciones; verde: calculados con el modelo WRF; azul: mejorados usando RNA.

5.1.1.2 Energía generada por el parque eólico Totoral

Otro dato de entrada necesario en el entrenamiento de las RNA para realizar pronósticos de la energía generada por el parque eólico, es una serie de tiempo de la energía total generada por el parque, la que fue construida sumando la energía producida por cada una de las 23 turbinas que componen el parque Totoral.

En la figura 15 se muestra la energía generada en función de la rapidez del viento. Como referencia, se muestra también la curva de ma-

nufactura de las turbinas que componen el parque. Los valores están normalizados a la PN del parque.

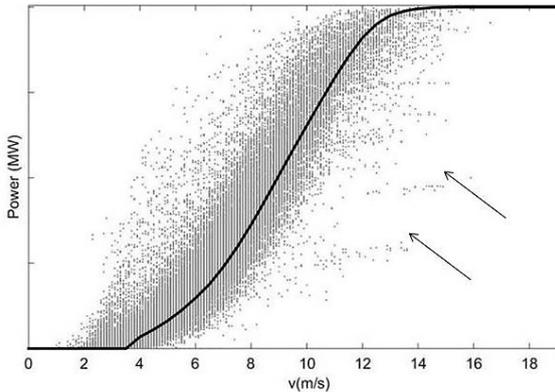


Figura 15. Energía generada por el parque eólico Totoral en función del viento. La curva continua negra representa la curva de potencia normalizada de las turbinas que componen el parque. Las flechas señalan casos en donde no todas las turbinas están en operación.

Puede observarse en la figura 15 una dispersión de los puntos experimentales en torno a la curva de manufactura, lo que en general es un comportamiento esperado. Sin embargo, la figura muestra además que algunos puntos se alejan considerablemente de la curva de potencia, como los indicados por las flechas. Estos puntos corresponden a casos en donde hay turbinas que no están en funcionamiento, ya sea por mantenimiento o por fallas de otra naturaleza. Para filtrar estos datos, se construye un Índice de Alarma (I) que varía entre cero -ninguna turbina está en operación- y uno, -todas las turbinas están en operación-.

Otro factor a ser tomado en cuenta es la restricción impuesta por el CDEC-SIC (actualmente CEN) sobre la máxima energía que el parque puede vender a la red central, ya sea por la falta de capacidad de las líneas de transmisión para absorber toda la energía generada por estas fuentes, como también por la variabilidad que las caracteriza. Este tipo de restricción afecta a las centrales eólicas y solares, precisamente por su variabilidad.

La figura 16 muestra un ejemplo en donde ocurre este tipo de restricción, en un día particular (6 de agosto, 2016): Al principio del día se le permite al parque inyectar 60 MW que, por ser mayor que la potencia nominal (46 MW), es equivalente a una ausencia de restricción. La restricción afecta al parque entre las 10 y 16 horas, en donde se le permite inyectar una cantidad menor a la potencia nominal. En este intervalo, hay momentos en los cuales las condiciones meteorológicas son tales que el parque generaría más energía (curva gris en la figura) que la que puede vender a la red. La diferencia entre la energía que puede generar el parque y la restricción permite estimar la pérdida económica sufrida por el parque, como consecuencia de esta restricción.

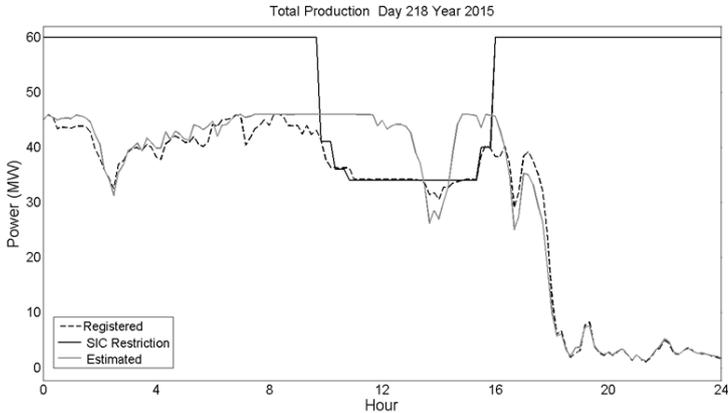


Figura 16. Ciclo diario de la energía generada en el parque eólico Totoral el 6 de agosto del 2016 (línea punteada), restricciones del CDEC-SIC (línea continua negra) y valor estimado de la energía de acuerdo a las condiciones meteorológicas (línea continua gris).

Una vez filtrados los datos de energía por mantención o fallas en turbinas, además de las restricciones del CEN, los datos pueden ser filtrados nuevamente para descartar errores en las mediciones. Para este proceso se usan también RNA, complementados procesos gaussianos [46].

5.1.2 Resultados: Pronóstico de la energía que genera el parque eólico Totoral

Una vez generadas las series de tiempo de pronósticos meteorológicos con el modelo WRF validado, la serie de datos meteorológicos y la serie de tiempo de la energía generada por el parque, se procede a entrenar las RNA para generar pronósticos de la energía producida por el parque eólico. Este proceso se hace con el apoyo del asociado Internacional ZSW.

La figura 17 (ver página siguiente) muestra el resultado para algunos días particulares. En la figura pueden observarse diversos casos, en los cuales el ajuste entre modelo y observaciones es variable. Para poder juzgar la calidad del modelo, se calcula el RMSE. Se encuentra que el error cuadrático normalizado a la PN del parque crece con el horizonte de pronóstico, con un valor de un 12% y un 17% a las 24 horas (un día) y a las 120 horas (5 días), respectivamente. Este error es bastante menor que el error de pronósticos generados por otras empresas en Chile.

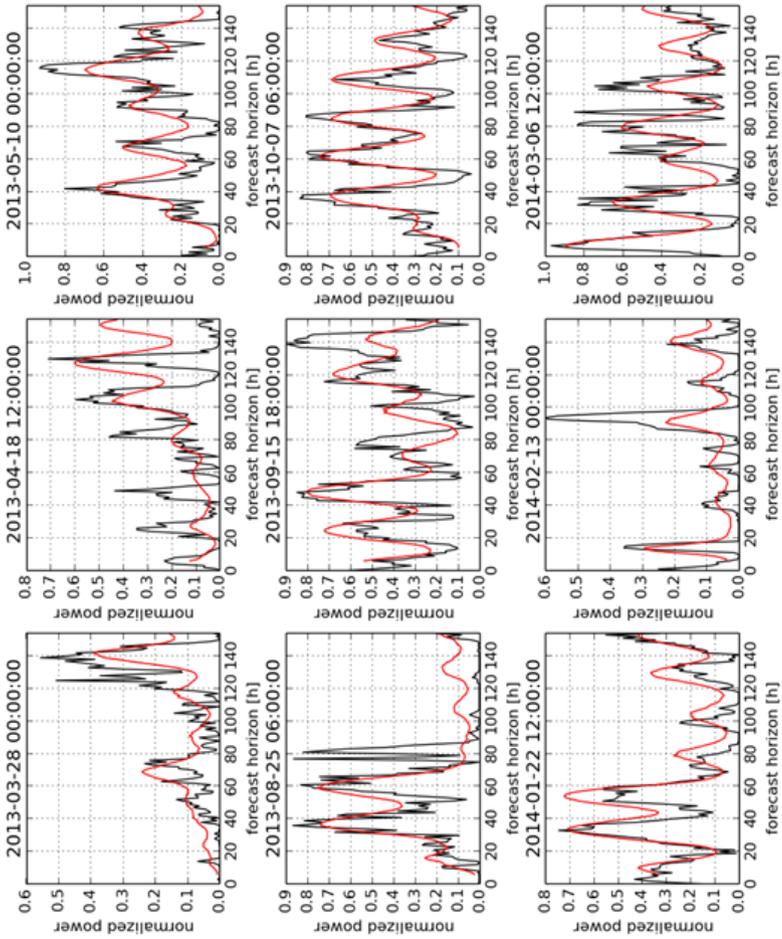


Figura 17. Pronóstico de la energía generada en el parque eólico Totoral (rojo). Las líneas negras representan los valores observados.

6

FUTURO DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES

Para lograr que la participación de las energías renovables en la matriz energética sea significativa, tanto a nivel mundial como nacional, es necesario, no sólo que sean amigables desde el punto de vista medioambiental, sino también que las tecnologías que se usan para transformar el recurso renovable en alguna forma de energía útil sea competitivo en el mercado.

Para evaluar el costo de la energía generada por una central de energía, sea esta renovable o no renovable, es necesario tomar en cuenta diversos factores. Existen costos iniciales que son comunes a cualquier central, como el precio de las tecnologías, costos de transporte, instalación, sistema eléctrico y otros que pueden depender del tipo de central. Una vez instalada la central, existen costos de operación y mantenimiento que perduran durante su vida útil.

La diferencia fundamental entre los costos de centrales que usan combustibles fósiles y aquellas que usan fuentes renovables reside en el hecho de que a las primeras debe agregárseles el precio del combustible, que es un costo permanente y que varía de acuerdo a las fluctuaciones del mercado, mientras que, en el caso de la segunda, el insumo que necesitan para su funcionamiento se encuentra de manera natural en la naturaleza y por lo tanto es gratis.

A pesar de lo anterior, las centrales renovables tienen costos adicionales. Existen restricciones por el hecho de que deben ser instaladas en aquellos lugares en donde el recurso existe, por lo que eventualmente la energía generada debe ser transmitida hasta el lugar de consumo. Consecuentemente, la distancia al punto de evacuación juega un rol en el costo de generación.

Otro factor a considerar en el costo de generación de una central renovable, es la energía que genera en el tiempo de vida útil de la central. Éste varía de acuerdo a las tecnologías pero, en general, se considera que es del orden de unos veinte años. En el caso de un parque eólico o solar FV, la energía generada depende de las condiciones meteorológicas del lugar

como viento y radiación, lo que determina el FP. Mientras mayor sea el FP más energía genera, más rápido se recuperará la inversión y más rentable será el parque.

Las energías renovables son competitivas en la medida de que el precio de generación del MWh sea similar al de las tecnologías convencionales. Como se explicó anteriormente, a medida que los recursos fósiles se van agotando, el precio de explotación del recurso aumenta, y con ello también el precio de generación de energía a partir de centrales convencionales, lo que significa una oportunidad de desarrollo para las energías renovables.

Por otro lado, a medida que el desarrollo tecnológico mejora, las energías renovables se van haciendo cada vez más competitivas. Según la American Wind Energy Association (AWEA), basado en el Análisis de Costo Nivelado de Energía (LCOE) realizado por la firma Lazard de Wall Street, la energía eólica es actualmente una de las fuentes de energía más competitivas [47]. Según esta fuente, en algunas partes de Estados Unidos, en el año 2017 el MWh de generación eólica (no subsidiado) varía entre los US\$ 30 y los US\$ 60, siendo el precio más competitivo dentro de las energías renovables. Además, este valor es comparable con el precio de generación de las centrales de ciclo combinado de gas, que fluctúa entre los US\$ 30 y los US\$ 60 por MWh, que es la fuente de generación más barata dentro de las energías convencionales.

En el caso de la energía fotovoltaica, el precio de los paneles ha disminuido mucho durante el último tiempo, haciéndolo también competitivo con la energía eólica. Según el Climate Scope versión 2017 [33], el precio de generación de energía FV ha disminuido en alrededor de un 75% en el periodo 2010 – 2017. El precio de generación media de energía solar FV con paneles cristalinos varía entre US\$ 37 y los US\$ 48 el MWh [47].

Este hecho se ve reflejado también en el aumento de la participación de las energías renovables en la matriz energética chilena, logrando un 18% en el año 2017. La baja en el costo de la energía FV incide en el crecimiento de la participación de esta fuente, superando en los últimos años incluso a la energía eólica (figura 10).

Estas consideraciones, sumado a un mejoramiento continuo de las tecnologías que transforman recursos renovables en energía eléctrica

ca u otra forma de energía, permiten suponer que la participación de las energías renovables en la matriz energética, tanto a nivel mundial como nacional, irá ganando en participación, lo que se traduce, no sólo en una mejora de la calidad del aire, sino también en una disminución de los GEI que se emiten a la atmósfera, producto de la generación de energía usando combustibles fósiles.

ANEXO

CENTRALES ERNC INSTALADAS EN CHILE

CENTRALES HIDROELÉCTRICAS

UNIDAD	CAPACIDAD INSTALADA [MW]	REGIÓN	AÑO
Sauce Andes	1.4	V	1909
Carena	10	RM	1943
Volcán	13	RM	1944
Los Bajos	5.5	RM	1944
Los Molles	18	IV	1952
Sauzalito	12	VI	1959
Juncalito	1.5	V	1994
Capullo	12	X	1995
Eyzaguirre	1.9	RM	2003
Chiburgo	19.4	VII	2007
El Rincón	0.3	RM	2007
Ojos de Agua	9	VII	2008
Coya	12	VI	2008
El Manzano	4.9	IX	2008
Puclaro	5.6	IV	2008
Pehui	1.1	XIV	2009
Truful truful	0.8	IX	2009
Lircay	19	VII	2009
Los Corrales	0.8	XIV	2010
lSeamneCnte	5.9	VII	2010
Doña Hilda	0.4	XIV	2010
Trueno	5.6	IX	2010
La Paloma	4.6	IV	2010

UNIDAD	CAPACIDAD INSTALADA [MW]	REGIÓN	AÑO
El Tártaro	0.1	V	2010
Dongo	6	X	2010
Cavanca	2.8	I	2010
Minihidro Alto Hospicio	1.1	I	2010
Minihidro El Toro N°2	1.1	I	2010
Donguil	0.3	IX	2011
La Arena	6.8	X	2011
Licán	18	XIV	2011
Reca	1.7	XIV	2011
Guayacán	12	RM	2011
El Diuto	3.3	VIII	2011
Mallarauco	3.4	VI	2011
Mariposas	6.3	VII	2011
Muchi	1	XIV	2011
Purísima	0.4	VII	2012
Callao	3.3	X	2012
El Canelo	6	IX	2012
Allipén	2.6	IX	2012
Nalcas	6.8	X	2012
Los Corrales 2	1	XIV	2013
Don Walterio	3	XIV	2013
Providencia	14.2	VII	2013
Roblería	4	VII	2013
Hidrobónico MC1	9	X	2013
Hidrobónico MC2	3.2	X	2013
Ensenada	1.2	X	2013
El Arrayán	0.2	XIV	2013

UNIDAD	CAPACIDAD INSTALADA [MW]	REGIÓN	AÑO
El Llano	1.9	RM	2013
Las Vertientes	1.7	RM	2013
Maisan	0.6	IX	2013
Río Huasco	5.1	III	2013
Renaico	6.3	VIII	2013
Contra	0.3	XIV	2013
Alto Renaico	1.5	VIII	2014
Boquiamargo	1.1	VIII	2014
Quillaileo	0.8	VIII	2014
Los Padres	2.2	VIII	2014
Pichilonco	1.2	XIV	2014
María Elena	0.3	X	2014
Collil	7	X	2014
Minihidro Santa Rosa	1.25	I	2014
Los Hierros II	6	VII	2015
Pulelfu	9	X	2015
Las Flores	1.6	XIV	2015
Los Colonos	0.6	X	2015
Curileufu	0.2	XIV	2015
Llauquereo	1.8	VIII	2015
Picoiquén	19.6	IX	2015
Trailelfú	2.5	IX	2015
Bureo	2.2	VIII	2015
Dosal	0.3	VII	2015
Itata	20.4	VIII	2015
Río Mulchén	3	VIII	2015
El Mirador	3	VIII	2015
Molinería Villarrica	0.6	IX	2016

UNIDAD	CAPACIDAD INSTALADA [MW]	REGIÓN	AÑO
Munilque 1	0.6	VIII	2016
Munilque 2	0.6	VIII	2016
Carilafquén	19.8	IX	2016
Malalcahuello	9.2	IX	2016
El Agrio	2.5	IX	2016
Cumpeo	5.8	VII	2016
El Colorado	2	X	2016
Chanleufu	3.4	X	2016
La Montaña 1	3	VII	2016
Tránquil	0.4	XIV	2016
El Galpón	1.3	VII	2017
Riñinahue	1	XIV	2017
Río Colorado	15	VII	2017
PMGD Piutrel	0.8	XIV	2017
PMGD Viña Tarapacá	0.3	RM	2017
Panguipulli PMGD	0.4	XIV	2017
Chanleufu II	8.4	X	2017
Caliboro	1.5	VIII	2017
La Bifurcada	0.2	VIII	2017
La Viña - Alto La Viña	0.6	VIII	2017
Melo	3.1	VIII	2017
Santa Isabel	1.5	VIII	2017
Dos Valles	3	VI	2017
La Montaña 2	1.9	VII	2017
Arrayán	1.2	RM	2017
Los Morros	3.1	RM	1930 -1994
Auxiliar del Maipo (Caemsa)	5.1	RM	1962- 1985

CENTRALES EÓLICAS

UNIDAD	CAPACIDAD INSTALADA [MW]	REGIÓN	AÑO
Eólica Canela	18.15	IV	2007
Eólica Canela II	60	IV	2009
Eólica Monte Redondo	48	IV	2010
Eólica Totoral	46	IV	2010
Eólica Punta Colorada	20	IV	2011
Eólica Talinay	90	IV	2013
Eólica Ucuquer	7.2	VI	2013
Eólica Ucuquer 2	10.75	VI	2014
Eólica Cuel	33	VIII	2014
Eólica El Arrayán	115	IV	2014
Eólica San Pedro	36	X	2014
Eólica Los Cururos	109.6	IV	2014
Eólica Punta Palmeras	45	IV	2014
Eólica Valle de los Vientos	90	II	2014
Eólica Talinay Poniente	60.6	IV	2015
Eólica Taltal	99	II	2015
Eólica Raki	9	VIII	2015
Eólica Huajache	6	VIII	2015
Eólica Renaico	88	IX	2016
Eólica Los Buenos Aires	24	VIII	2016
Eólica San Juan	193.2	III	2016
Eólica San Pedro II	65	X	2016
Eólico Las Peñas	8.4	VIII	2016
Eólica Iebu III	5.25	VIII	2016
Parque Eólico Sierra Gorda Este	112	II	2016

UNIDAD	CAPACIDAD INSTALADA [MW]	REGIÓN	AÑO
Eólica La Esperanza	10.5	VIII	2016
Eólica Lebu (Ampliación II)	3.47	VIII	2017
Eólica Lebu	6.54	VIII	2009 - 2014

CENTRALES SOLARES FOTOVOLTAICAS

UNIDAD	CAPACIDAD INSTALADA [MW]	REGIÓN	AÑO
Solar Tambo Real	2.94	IV	2012
Solar Santa Cecilia	2.96	III	2013
Solar Esperanza	2.88	III	2013
Solar SDGx01	1.28	IV	2013
Solar Hornitos	0.323	III	2013
Solar San Andrés	50.6	III	2014
Solar Llano de Llampos	101.02	III	2014
Solar PSF Pama	2	IV	2014
Solar PSF Lomas Coloradas	2	IV	2014
Solar Diego de Almagro	32.05	III	2014
Solar Techos Altamira	0.15	RM	2014
Solar Las Terrazas	3	III	2014
Pozo Almonte Solar 2	7.516	I	2014
Pozo Almonte Solar 3	16.038	I	2014
La Huayca Ii	25.05	I	2014
Solar Luna	2.96	IV	2015
Solar Luz del Norte	141	III	2015
Solar PV Salvador	68	III	2015
Solar Chañares	36	III	2015

UNIDAD	CAPACIDAD INSTALADA [MW]	REGIÓN	AÑO
Solar Lalackama 2	16.5	III	2015
Solar Lalackama	55	III	2015
Solar Loma Los Colorados	1.074	V	2015
Solar El Pilar - Los Amarillos	3	III	2015
Solar Sol	2.96	IV	2015
Solar Javiera	65	III	2015
Solar Carrera Pinto	93.5	III	2015
Solar Lagunilla	2.95	IV	2015
Maria Elena Fv	68	II	2015
Solar Jama	30.24	II	2015
Los Puquios	2.47	I	2015
Pozo Almonte Solar 1	9	I	2015
Pmgd Pica	0.63	I	2015
Pozo Almonte Solar 1	9	I	2015
Pmgd Pica	0.63	I	2015
Solar Bellavista	3	IV	2016
Solar Pampa Solar Norte	69.3	II	2016
Solar Las Araucarias	0.14	RM	2016
Solar las Mollacas	2.78	IV	2016
Solar La Chapeana	2.78	IV	2016
Solar Santa Julia	3	V	2016
Solar Conejo	104	II	2016
Solar La Silla	1.89	IV	2016
Solar Los Loros	45.82	III	2016
Solar Til Til	3	RM	2016
Solar Chuchiñi	2.88	IV	2016
Solar El Divisadero	3	IV	2016
Solar Quilapilún	103.02	RM	2016

UNIDAD	CAPACIDAD INSTALADA [MW]	REGIÓN	AÑO
Solar Cordillerilla	1.43	VII	2016
PMGD Parque Fotovoltaico San Pedro	3	RM	2016
Solar Alturas de Ovalle	6	IV	2016
Solar Ñilhue	1.1	V	2016
Solar La Esperanza II	9	VI	2016
Solar Hormiga Solar	2.541	V	2016
Andes Solar	21.795	II	2016
Parque Solar Pampa Camarones	6.24	XV	2016
Solar El Águila I	2.045	XV	2016
Solar Jama	22.41	II	2016
Solar El Romero	196	III	2017
Solar Piloto Solar Cardones	0.44	III	2017
Solar El Boco	3	V	2017
PMGD PFV Marchigüe II	9	VI	2017
Solar Cuz Cuz	3	IV	2017
PMGD Altos del Paico	2.1	RM	2017
PMGD Cintac	2.77	RM	2017
Solar Doña Carmen Solar	34.917	V	2017
Solar Las Turcas	3	RM	2017
Solar Antay	13	III	2017
Solar San Francisco	3	RM	2017
Solar Valle de la Luna II	3	RM	2017
El Queltehue	3	RM	2017
El Roble	9	RM	2017
Solar La Quinta	2.9	RM	2017
Panquehue II	6	V	2017

UNIDAD	CAPACIDAD INSTALADA [MW]	REGIÓN	AÑO
Parque Fotovoltaico Homero	3	VI	2017
Solar El Pelicano	100.3	IV	2017
Don Eugenio	3	VI	2017
Francisco Solar	3	VI	2017
Cabilsol	3	V	2017
El Pilpén	3	V	2017
Santuario Solar	3.43	V	2017
La Manga I	2.96	RM	2017
Chimbarongo	3	VI	2017
PFV Santiago Solar	115	RM	2017
El Cernicalo 2	1.5	VIII	2017
La Frontera	4.8	VI	2017
Portezuelo	3	VI	2017
Parque Solar Finis Terrae	138	II	2017
Uribe Solar	52.8	II	2017
Fv Bolero	146.64	II	2017
Pmgd Calama Solar I	9	II	2017
Cerro Dominador Pv	99.05	II	2017
Planta Solar Fotovoltaica Puerto Seco Solar	8.9	II	2017
Pmgd Calama Solar I	9	II	2017
Cerro Dominador Pv	99.05	II	2017
Planta Solar Fotovoltaica Puerto Seco Solar	8.9	II	2017

CENTRALES DE BIOENERGÍA

UNIDAD	CAPACIDAD INSTALADA [MW]	REGIÓN	AÑO
Laja	12.6	VIII	1995 - 2007
Ancalí 1	1.6	VIII	2013
Trebal Mapocho	8.2	RM	2012
Arauco	24	VIII	2012
Nueva Aldea III	37	VIII	2008
Viñales	22	VII	2013
Santa Fe	67.2	VIII	2012
Santa Irene	0.4	VI	2013
Las Pampas	0.4	VI	2014
CMPC Laja	25	VIII	2013
CMPC Pacífico	33	VIII	2014
CMPC Santa Fe	5	VIII	2015
Lautaro-Comasa	26	IX	2012
Lautaro-Comasa 2	22	IX	2015
HBS	2.2	VIII	2011
Loma Los Colorados	2	V	2010
Loma Los Colorados II	18.2	V	2011
Masisa (Cabrero)	11	VIII	2011
Escuadrón	14.2	VIII	2008 - 2009
Nueva Aldea I	14	VIII	2005
Tamm	0.191	VI	2013
Energía León	7.1	VIII	2014
Energía BioBio	0	VIII	2014
Energía Pacífico	15.6	VI	2014
El Molle	4.5	V	2015

Santa Marta	17.732	RM	2014
PMGD Los Pinos (Etapa I)	3	VIII	2017
PMGD Molina	1	VIII	2017
Lepanto	2.5	RM	2017

CENTRALES DE GEOTERMIA

UNIDAD	CAPACIDAD INSTALADA [MW]	REGIÓN	AÑO
Cerro Pabellón	27,5	II	2017
Cerro Pabellón	27,5	II	2017

**Fuente: Reporte Anual 2017. Coordinador eléctrico Nacional. www.cne.cl*

REFERENCIAS

- [1] Cross, R., Spencer, R., 2008. Sustainable gardens. CSIRO Publishing, Collingwood, Melbourne. ISBN 978-0-643-09422-2.
- [2] Knight, E.H., 1882. Knight's American mechanical dictionary: a description of tools, instruments, machines, processes and engineering, history of inventions, general technological vocabulary; and digest of mechanical appliances in science and the arts. Publicado por: Boston: Houghton, Mifflin and Company.
- [3] Sears Zemansky, 2009. Física Universitaria, con Física Moderna. Vol. II, 12ª Edición. Editores: Young-Freedman.
- [4] Synwolt, 2006. Mehr als Sonne, Wind und Wasser: Energie für eine neue Ära, WILEY-VCH Verlag BmbH & Co. Weinheim.
- [5] Berger, A., Mesinger, F., Sijacki, D., 2012. Climate Change. Interferences from Paleoclimate and Regional Aspects. Springer Verlag.
- [6] Einstein, A., 2003. The meaning of Relativity. ISBN: 9781134449798, 192 pp. (traducido del original publicado en 1922).
- [7] Toribio, J., Kharin, V., 2000. A hydrogen diffusion model for applications in fusion nuclear technology. Fusion Engineering and Design 51-52, 213-218. DOI: 10.1016/S0920-3796(00)00316-1.
- [8] Ertling, D., 1996. Theoretische Meteorologie. Eine Einführung. Springer Verlag.
- [9] Brasseur G., Solomon, S., 1984. Aeronomy of the middle atmosphere: chemistry and physics of the stratosphere and mesosphere. Reidel Publishing Company.
- [10] Kalthoff, N., Bischoff-GauX, I., Fiebig-Wittmaack, M., Fiedler, F., Thürauf, J., Novoa, E., Pizarro, C., Castillo, R., Gallardo, L., Rondanelli, R., Kohler, M., 2002. Mesoscale wind regimes in Chile at 30°S. Journal of Applied Meteorology 41, 953-970.
- [11] Twidell, J. and Weir T., 2016. Renewable energy resources. Taylor and Francis, London and New York.
- [12]. Schröer, R., 2014. Sistema de Torre Solar. Estado y perspectiva. Editores: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ).

- [13] Kuravi, S., Trahan, J., Goswami, Y., Rahman, M.M., Stefanakos, E.K., 2013. Thermal energy storage technologies and systems for concentrating solar power plants, *Progress in Energy and Combustion Science* 39, 285-319.
- [14] McEvoy, A., Castaner, L., Markvart. T., 2012. *Solar cells: materials, manufacture and operation*. Elsevier. Academic Press.
- [15] <https://www.nzz.ch/wissenschaft/photovoltaik-silizium-solarzelle-mit-neuem-effizienz-rekord-ld.152609>
- [16] Montecinos, S., Gutierrez J. R., López-Cortés F, López, D., 2016. Climatic characteristics of the semi-arid Coquimbo Region in Chile. *Journal of Arid Environments* 126, 7-11.
- [17] Bischoff-Gauss, I. Kalthoff, N., Fiebig-Wittmaack, M., 2006. The influence of a storage lake in the Arid Elqui Valley in Chile on local climate. *Theoretical and Applied Climatology* DOI 10.1007/s00704-005-0190-8.
- [18] Letcher, T., 2017. *Wind Energy Engineering. A Handbook for Onshore and Offshore Wind Turbines*, Elsevier.
- [19] Montecinos, S., L. Bacuñan-Godoy, P. Salinas, O. Astudillo, D. Lopez, 2013. Estimating spatial distribution of air temperature from meteorological stations using atmospheric model, *Journal of Atmospheric Sciences* 5, 1682-1687.
- [20] Twidell, J., Weir, T., 2005. *Renewable Energy Resources*, Segunda edición, Taylor & Francis, London and New York.
- [21] Fouquet, R., 2009. A brief history of energy, en J. Evans y L.C. Hunt (eds.), *International Handbook of the Economics of Energy*, Cheltenham, UK and Northampton, MA, USA: Edward Elgar Publishing, p. 1-19.
- [22] https://elpais.com/internacional/2011/03/14/actualidad/1300057215_850215.html
- [23] <https://www.eumetsat.int/website/home/AboutUs/International-Cooperation/WorldMeteorologicalOrganizationWMO/>
- [24] <http://www.cambioclimaticochile.cl>
- [25] André, F.J., de Castro, L.M., Cerdá, E., 2012. Las energías renovables en el ámbito internacional, www.revistasice.com

- [26] Li, M., 2017. Universidad de Utah, Informe Anual Energía Mundial 2017-2050 (Petróleo y Gas) <http://ruddygarroussmeinewelt-sicht.blogspot.com/2017/06/informe-anual-energia-mundial-2017.html>
- [27] BP Energy outlook, Edición 2017. www.britchamexico.com
- [28] Separate Financial Statement, 2012, Edison Report, <https://www.edison.it/en/sustainability-report-2012>
- [29] Climate Scope 2016 <http://2016.global-climatescope.org/en>
- [30] Coordinador Eléctrico Nacional. www.cne.cl
- [31] Anuario Estadístico de energía 2017 publicado por el CNE y el Ministerio de energía. www.energia.gob.cl
- [32] Climate Scope 2017. <http://global-climatescope.org/en>
- [33] <http://www.gruposaes.cl/sustentabilidad/eficiencia-energetica/parque-eolico>
- [34] Explorador eólico-solar. <http://walker.dgf.uchile.cl/Explorador/Eolico2>
- [35] Santana, C., Falvey, M., Ibarra, M., García, M., 2014. Energías renovables en Chile. El potencial eólico, solar e hidroeléctrico de Arica a Chiloé. Ministerio de Energía del Gobierno de Chile and GIZ, Santiago, Chile.
- [36] <http://energiaabierta.cl/estudios>
- [37] Anderson, C.L., Cardell, J.B., 2013. Wind Power Uncertainty and Power System Performance. *Engineering* 5, 41-51. DOI: 10.4236/eng.2013.510A007.
- [38] Bossuyt, J., Meneveau C., Meyers, J., 2017. Wind farm power fluctuations and spatial sampling of turbulent boundary layers. *Journal of Fluid Mechanics* 823, 329 -344. DOI: 10.1017/jfm.2017.328
- [39] Kalogirou, S.A., 2001. Artificial neural networks in renewable energy systems applications: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 5, 373-401. DOI: 10.1016/S1364-0321(01)00006-5
- [40] Lazzus, J., Salfate, I., Montecinos, S., 2013. Hybrid neural network-particle swarm algorithm to describe chaotic time series. *Neural Network World*, 24, 601-617, doi: DOI: 10.14311/NNW.2014.24.034
- [41] <https://www.mmm.ucar.edu/weather-research-and-forecasting-model>

- [42] Holton, J.R., 2012. An Introduction to Dynamic Meteorology, 5^{ta} edición, Academic Press.
- [43] www.ceazamet.cl
- [44]. Sukoriansky, S., 2008. Implementation of the Quasi-Normal Scale Elimination (QNSE) Model of Stably Stratified Turbulence in WRF. Report on WRF-DTC Visit of Semion Sukoriansky. www.dtcenter.org/visitors/reports_07/Sukoriansky_report.pdf
- [45] Li, G., Shi, J., 2010. On comparing three artificial neural networks for wind speed forecasting. *Applied Energy* 87, 2313-2320.
- [46] Manobel, B., Sehnke, Frank, Lazzús, J., Salfate, I., Felder, M., Montecinos, S., 2018, Wind turbine power curve modeling based on Gaussian Processes and Artificial Neural Networks. *Renewable Energy* 125, 1015-1020.
- [47] Lazard's Levelized cost of Energy Analysis, versión 11.0, 2017. www.awea.org

La revolución industrial viene de la mano con un aumento significativo del requerimiento energético, llevando al hombre a utilizar combustibles fósiles como fuente principal de energía que, hasta ese momento, era satisfecho por fuentes renovables. El uso indiscriminado de los combustibles fósiles experimentado desde entonces ha causado un aumento sostenido de la concentración de dióxido de carbono, uno de los principales gases de efecto invernadero. Este hecho, sumado a la disminución de descubrimientos de nuevos yacimientos de combustibles fósiles, ha sido una de las causas que ha llevado a la humanidad a volver su mirada hacia las fuentes renovables para satisfacer su creciente demanda de energía.

ENERGÍAS RENOVABLES: ESCENARIO ACTUAL Y PERSPECTIVAS FUTURAS presenta al lector el uso de fuentes de energía en un contexto histórico, con énfasis en el uso de las energías renovables en el mundo moderno. Se analizan las condiciones que deben satisfacerse para que la incorporación de estas fuentes limpias a la matriz energética sea económica, social y ambientalmente factible.

El lenguaje usado en este libro es accesible al público general y puede ser usado como material de apoyo para profesores y estudiantes de Educación Media y Superior.



INNOVANDO EN EFICIENCIA ENERGÉTICA
Y SUSTENTABILIDAD REGIONAL

