



Universidad de Jaén

Escuela de Doctorado

TESIS DOCTORAL



**DE LO GLOBAL A LO LOCAL: EL ROL DE
LOS SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS
DESCENTRALIZADOS EN LA TRANSICIÓN
ENERGÉTICA SOSTENIBLE. UN ANÁLISIS
APLICADO A CHILE Y LA REGIÓN DE
AYSÉN**

**PRESENTADA POR:
JUAN CARLOS OSORIO ARAVENA**

**DIRIGIDA POR:
EMILIO MUÑOZ CERÓN**

JAÉN, 20 DE DICIEMBRE DE 2021

“Quisiera encontrar palabras que me permitan censurar a los que ponen el culto a los hombres por encima del culto al Sol”

“I would like to find words that allow me to censure those who put the cult of men above the cult of the Sun”

LEONARDO DA VINCI

“La mejor manera de predecir el futuro es inventarlo”

“The best way to predict the future is to invent it”

ALAN KAY

Agradecimientos

Quiero partir agradeciendo, profundamente, a mi familia. En primer lugar, quiero agradecer a mi hija, ya que a pesar de su corta edad, me ha entregado grandes enseñanzas con sus acciones cotidianas y sus inesperadas preguntas. Sin duda, ella ha sido, además de una maestra, una gran fuente de motivación para continuar en este camino de aprendizaje sobre la energía y el medioambiente. En segundo lugar, quiero agradecer a mi madre y familia que está en Chile. En todos estos años, he sentido y gozado desde la distancia ese apoyo incondicional que me han brindado en muchos aspectos. Y, en tercer lugar, quiero agradecer a Natalia, la madre de mi hija, por el acompañamiento y aprendizaje brindado a lo largo de nuestra estadía en España.

También, agradezco profundamente a la Universidad Austral de Chile. Casa de estudio superiores que me ampara, prácticamente, desde que salí de la región de Aysén en el año 2000. Primero, gracias por albergarme como estudiante, donde más allá de la formación profesional de calidad que recibí, me transmitió valores y conocimientos que hasta hoy me impulsan a contribuir en esos cambios tan necesarios para este mundo. Segundo, gracias por darme la oportunidad de trabajar en ella, y mucho más, por poder hacerlo y contribuir en mi región natal, a través del Campus Patagonia. Y tercero, muchas gracias por su actual apoyo para continuar mis estudios de postgrado.

Por supuesto, también quiero agradecer a la Universidad de Jaén. Principalmente al profesorado del Máster en Energías Renovables, debido a que, más allá de la información facilitada y los múltiples conocimientos transmitidos, han sido una fuente de inspiración para continuar trabajando en la temática energética y medioambiental. Pero en especial, quiero agradecer profundamente a Emilio Muñoz, por toda la confianza, dedicación, enseñanza y guía entregada desde su rol como mi director de tesis. Gran parte de mis logros científicos se los debo a él.

Finalmente, quisiera también agradecer al Profesor Christian Breyer y su grupo de investigación en economía solar de la Lappeenranta University of Technology de Finlandia. Más allá de todo el aprendizaje y apoyo que me brindaron durante mi estancia de investigación, el cual fue crucial para la profundidad que adquirió mi tesis doctoral, quiero darles las gracias por su hospitalidad, cordialidad y por esos buenos momentos vividos en ese país.

Resumen

Obtener un sistema energético que contribuya a asegurar la estabilidad climática del planeta es uno de los desafíos más importantes de la primera mitad del siglo XXI. Con el propósito de contribuir en la búsqueda de vías que permitan superar la crisis climática global, pero desde acciones locales, y apelando a que la tecnología fotovoltaica (FV) cuenta con excelentes características para habilitar la transición energética que se necesita, esta tesis doctoral tiene como principal objetivo analizar, desde un enfoque global y local, el rol que la energía solar FV descentralizada podría jugar en la transición energética sostenible de un país y territorio específico. Para esto, se emplea como caso de estudio a Chile y particularmente, una de las regiones que lo conforma: la región de Aysén. Tanto Chile como la región de Aysén tienen aspectos que son un reflejo de la crisis global del Antropoceno, pero también cuentan con una gran oportunidad para implementar soluciones ejemplares basadas en sus enormes potenciales de energía renovable (ER). Para realizar dicho análisis se han considerado todos los sectores consumidores de energía y se utilizó una herramienta desarrollada por la *Lappeenranta University of Technology* (LUT), con la que se modelaron escenarios de transición energética hacia un sistema 100 % basado en ER para Chile, desde un enfoque global y local, donde, en el enfoque local se incluyó a la región de Aysén.

Los resultados revelan que, tanto en Chile como en la región de Aysén, lograr un sistema energético 100% renovable para el año 2050 es técnicamente factible y económicamente viable. En ese año, dependiendo del enfoque y escala territorial, la contribución a la generación eléctrica por parte de la tecnología FV en su conjunto varía entre 39–86 % y, la contribución de la FV descentralizada varía entre 9–12 %; no obstante, la FV descentralizada aporta entre un 27–52 % de la electricidad final que es mayormente consumida en las ciudades por los sectores eléctrico, térmico y transporte. A su vez, la energía solar FV descentralizada crearía en Chile entre el 9–15 % de los empleos anuales directos durante el periodo de transición. Es decir, entre los años 2020 y 2050, el sector de la FV descentralizada crearía 174.274 empleos directos. Además, los resultados también revelan que Chile puede alcanzar la neutralidad en emisiones de carbono en el año 2030 y, se puede convertir en un país emisor negativo de gases de efecto invernadero a partir del año 2035. Todo esto sería posible utilizando menos del 10 % del potencial tecno-económico de ER disponible en este país.

Tras los resultados del trabajo de investigación realizado en esta tesis doctoral, se concluye que la energía solar FV es un elemento vital en la transición energética sostenible, así como también, alcanzar un sistema energético totalmente desfosilizado es más importante que lograr la neutralidad en las emisiones de carbono. Esto último se debe a que una transición a nivel país hacia un sistema energético 100 % renovable implicaría beneficios socio-ambientales y socioeconómicos locales, con impactos globales positivos que se necesitan con urgencia. Si Chile implementara una vía de transición hacia un sistema energético 100 % renovable, no solo podría convertirse en un caso ejemplar en el avance hacia una economía post-combustibles fósiles, si no que también podría contribuir a la transición energética global: a través de la extracción limpia de materias primas clave (como lo son el cobre y el litio), y a través de la producción de combustibles y químicos basados en ER. En resumen, la tecnología FV puede contribuir en la mitigación del cambio climático y la reducción de los niveles de contaminación del aire en las ciudades, al tiempo que impulsa el crecimiento económico local; todo esto, de una manera más descentralizada y participativa.

Abstract

Obtaining an energy system that will help to ensure the climactic stability of the planet is one of the most important challenges of the first half of the 21st century. In order to contribute to the search for ways to overcome the global climate crisis, from local activities, and appealing to the fact that photovoltaic (PV) technology has excellent characteristics which could enable the energy transition that is needed, this doctoral thesis has as its main objective the analysis, from a global and local approach, the role that decentralized solar PV could play in the sustainable energy transition of a specific country and territory. For this purpose, Chile and one of its regions (the Aysén region) are used as a case study. Both Chile and the Aysén region have aspects that reflect the global crisis of the Anthropocene, but they also present a great opportunity to implement exemplary solutions, based on their enormous renewable energy (RE) potentials. To carry out this analysis, all energy-consuming sectors were considered. A tool developed by the Lappeenranta University of Technology (LUT) was used, with which energy transition scenarios were modelled towards a 100% RE-based system for Chile, from a global and local approach. The Aysén region was included in the local approach.

The results reveal that, both in Chile and in the Aysén region, achieving a 100% RE system by 2050 is technically feasible and economically viable. In that year, depending on the approach and territorial scale, the contribution to electricity generation by PV technology as a whole would vary between 39–86%. The contribution of decentralized PV would be between 9–12%. However, decentralized PV would contribute 27–52% of the final electricity that is mostly consumed in cities by the power, heat and transport sectors. In turn, decentralized solar PV would create between 9–15% of annual direct jobs in Chile during the transition period. In other words, between 2020 and 2050, the decentralized PV sector would create 174,274 direct jobs. In addition, the results also reveal that Chile could achieve carbon neutrality in 2030 and could become a negative greenhouse gas emitter by 2035. All of this would be possible by using less than 10% of the techno-economic potential of RE available in this country.

From the results of the research work carried out in this doctoral thesis, it is concluded that solar PV is a vital element in the sustainable energy transition. We also find that achieving a fully defossilized energy system is more important than achieving carbon neutrality. The latter is due to the fact that a transition at the country level towards a 100% RE system would imply local socio-environmental and socio-economic benefits, with positive urgently needed global impacts. If Chile implements a transition path towards a 100% RE system, it could not only become an exemplary case in moving towards a post-fossil fuel economy, but could also contribute to the global energy transition through the clean extraction of key raw materials (such as copper and lithium), and through the production of RE-based fuels and chemicals. In summary, PV technology can contribute to mitigating climate change and reducing air pollution levels in cities, while boosting local economic growth, doing all of this in a more decentralized and participatory way.

Índice general

Lista de abreviaciones	13
Sección I: Memoria	21
1.1 Justificación	23
1.2 Motivación, hipótesis y objetivos	27
1.3 Estructura de la memoria	28
2. Contextualización	29
2.1 Importancia de un cambio en el sistema energético global	29
2.2 Acciones necesarias hacia sistemas energéticos sostenibles	31
2.3 Estado del arte sobre el modelado de sistemas energéticos 100 % renovables	37
2.4 Estado actual y rol de la energía solar FV en los escenarios energéticos globales a largo plazo	38
2.5 Chile y la región de Aysén como caso de estudio para una transición energética sostenible	41
2.6 Situación actual de la energía solar FV en Chile y su proyección a largo plazo	48
3. Metodología	51
3.1 Identificación de barreras y oportunidades asociadas a la solar FV descentralizada	51
3.2 Identificación de criterios, factores e indicadores asociados a la planificación energética	52
3.3 Adaptación de una herramienta de modelado energético con enfoque global a uno local	52
4. Resultados y discusión	55
4.1 Barreras y oportunidades en torno a la tecnología solar FV descentralizada en Chile y la región de Aysén	55
4.1.1 Barreras	55
4.1.2 Oportunidades	57
4.2 Criterios, factores e indicadores asociados a los sistemas solares FV	60
4.3 El rol de la energía solar FV descentralizada en la transición energética en función del enfoque territorial del modelado	62
5. Conclusiones	69
Conclusions	72
6. Nuevas líneas de investigación	75
Referencias	77
Sección II: Trabajo de investigación y publicaciones en el marco de la tesis doctoral	89
Trabajo de investigación	91
Publicaciones	93

Lista de abreviaciones

COP21	21° Conferencia de las Partes
FV	Fotovoltaico
GEI	Gases de efecto invernadero
GHI	Irradiación global horizontal
GW	Gigavatio
IEA	Agencia internacional de energía
IPCC	Panel intergubernamental por el cambio climático
KW	Kilovatio
KWh	Kilovatio-hora
LUT	Lappeenranta University of Technology
LUT-EST model	LUT Energy System Transition model
MW	Megavatio
NDC	Contribuciones nacionalmente determinadas
PFVR	Prosumidores fotovoltaicos residenciales
PTSP	Programa techos solares públicos
PtX	Power-to-X
SSFVD	Sistemas solares fotovoltaicos descentralizados
TIR	Tasa interna de retorno
TWh	Teravatio-hora
USD	Dólares americanos

Índice de figuras

Figura 1. Comparación de reservas de energía planetaria renovables y finitas.....	23
Figura 2. Emisiones globales de gases de efecto invernadero por sector, año 2016.	29
Figura 3. Participación estimada de renovables en el consumo global de energía final en 2018.	31
Figura 4. Participación de renovables en el consumo global de energía final por sector en 2018....	33
Figura 5. Esquema del concepto <i>PtX</i> para la producción de combustibles y químicos.....	36
Figura 6. Capacidad global acumulada de energía solar FV y adiciones anuales entre 2010 y 2020.	39
Figura 7. Segmentación de la instalación solar FV por año entre 2011 y 2020, en GWp.	40
Figura 8. Participación de suministro primario de electricidad, térmica, biomasa y combustibles para un sistema energético global en el año 2050.....	41
Figura 9. Emisiones de gases de efecto invernadero en Chile por sector, en 2016.	42
Figura 10. Potencial de energías renovables en las regiones del sistema eléctrico nacional.	44
Figura 11. Mapa de Chile y sus regiones (izquierda) y la región de Aysén destacando sus áreas protegidas en verde (derecha).	46
Figura 12. Mapa del potencial de energía solar en la región de Aysén.	47
Figura 13. Capacidad instalada total acumulada de los sistemas solares FV centralizados en Chile.	48
Figura 14. Países con más altos niveles de energía solar FV en el sector de generación de electricidad.....	48
Figura 15. Capacidad instalada total acumulada de la FV descentralizada conectada a la red en Chile.	49
Figura 16. Estructura fundamental del LUT-EST model y sus principales entradas y salidas.	53
Figura 17. Representación esquemática del modelo LUT-EST para un sistema energético interconectado y con todos los sectores acoplados.	54
Figura 18. Comparación del potencial solar entre las regiones de Chile y el mundo en términos irradiación global horizontal.....	58
Figura 19. Generación de electricidad por tecnología para cubrir demanda de energía de todos los sectores (izquierda) y para los sectores eléctrico y térmico (derecha), durante el periodo de transición.	64
Figura 20. Capacidad instalada (izquierda) y generación de electricidad (derecha) por tecnología para cubrir demanda de todos los sectores durante el periodo de transición.....	65
Figura 21. Capacidad instalada (izquierda) y generación de electricidad (derecha) por tecnología y macro-zona para cubrir demanda de energía para todos los sectores en el año 2050.....	66

Índice de tablas

Tabla 1. Participación de la energía solar FV en la generación de electricidad y creación de empleos directos a diferentes escalas para el año 2050.....	25
Tabla 2. Aspectos y criterios que definen una transición hacia sistemas energéticos sostenibles.....	32
Tabla 3. Países y regiones con análisis de vías de transición para la obtención de sistemas energéticos 100 % renovables con una participación fotovoltaica superior al 50 % en el año 2050.....	38
Tabla 4. Artículos científicos y estudios que contienen proyecciones de escenarios energéticos para Chile y la contribución de las energías renovables y energía solar FV al 2050.....	49
Tabla 5. Tiempo de recuperación de la inversión (en años) para diferentes porcentajes de autoconsumo.....	56
Tabla 6. Tasa interna de retorno para diferentes porcentajes de autoconsumo.....	57
Tabla 7. Tiempo de recuperación de la inversión en años (izquierda) y la TIR (derecha) para diferentes porcentajes de autoconsumo en el caso de un incentivo del 30 % a la inversión inicial.....	59
Tabla 8. Criterios, factores e indicadores encontrados y que están asociados a los principales aspectos que son distintos a lo técnico y económico.....	61
Tabla 9. Porción de capacidad instalada por tecnología renovable en el 2050 para el escenario de transición energética desde un enfoque global.....	63
Tabla 10. Porción de generación de electricidad renovable por tecnología en el 2050 para el escenario de transición energética desde un enfoque local.....	64
Tabla 11. Creación de empleos directos durante la transición energética para Chile hacia un sistema energético 100 % renovable al 2050 considerando todos los sectores.....	67
Tabla 12. Resumen del trabajo de investigación realizado en el marco de la tesis doctoral.....	91

Estructura del documento

El contenido de esta tesis doctoral se estructura en dos secciones diferenciadas:

Sección I: Memoria

En la primera parte de este documento, a modo de introducción, se explican las razones que justifican la necesidad de un cambio en el sistema energético actual y se argumenta porqué las energías renovables en general, la tecnología fotovoltaica en particular y el modelado de escenarios de transición energética son clave para la consecución del cambio que se requiere en el actual sistema energético. A su vez, también en la introducción, se expone la motivación, la hipótesis y los objetivos (general y específicos) de esta tesis doctoral.

A continuación, se profundiza en la justificación y argumentación presentada en la introducción, así como también, se contextualiza el estado del arte del modelado de sistemas energéticos 100 % basados en fuentes renovables y la situación actual y futura de la tecnología fotovoltaica a nivel global. Además, se argumentan las razones por las que tanto Chile como la región de Aysén son casos de estudio interesante para el análisis de una transición energética sostenible. Se aporta en estos casos información sobre la situación actual y futura de la tecnología fotovoltaica en Chile.

Posteriormente, se presenta un resumen de la metodología empleada para abordar los objetivos específicos propuestos para la consecución del objetivo general y, se exponen y discuten los resultados obtenidos. Finalmente, se presentan las conclusiones de este trabajo y las nuevas líneas de investigación detectadas en el marco de esta tesis doctoral.

Sección II: Trabajo de investigación y publicaciones realizadas en el marco de la tesis doctoral

La segunda parte de este documento está compuesta por un resumen del trabajo de investigación realizado en el marco de la tesis doctoral y por un compendio de seis artículos científicos publicados en revistas indexadas. Esos artículos son las contribuciones científicas que surgieron durante la consecución de los objetivos específicos planteados y, en los cuales se basan tanto los resultados como las conclusiones de esta tesis doctoral.

Sección I: Memoria

1. Introducción

1.1 Justificación

El cambio climático es uno de los temas de mayor preocupación a nivel mundial. Su causa está relacionada con las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), las cuales, han aumentado en un 9,1 % entre 2010 y 2019 [1]. De hecho, nuestro planeta ya está experimentando consecuencias del cambio climático, y éstas, podrían aumentar significativamente en las próximas décadas [2].

Uno de los factores que más influye en el cambio climático y la crisis ambiental que se ha estado manifestando en los últimos años es nuestro sistema energético, cuya sostenibilidad ha sido cuestionada por diversos estudios [3–7]. Prueba de ello es que el sector energético es el responsable del 73,2 % de las emisiones globales de GEI [8], principalmente, por la combustión de recursos fósiles que, además, son recursos energéticos finitos. De hecho, en 2019, el 80,2 % del consumo mundial de energía final provino de los combustibles fósiles [9]. Sin embargo, tal como se puede deducir de la Figura 1, desde una perspectiva global, el potencial de las energías renovables en general, y de la energía solar en particular, es 820 veces mayor que el consumo mundial anual de energía proyectado para el 2050.

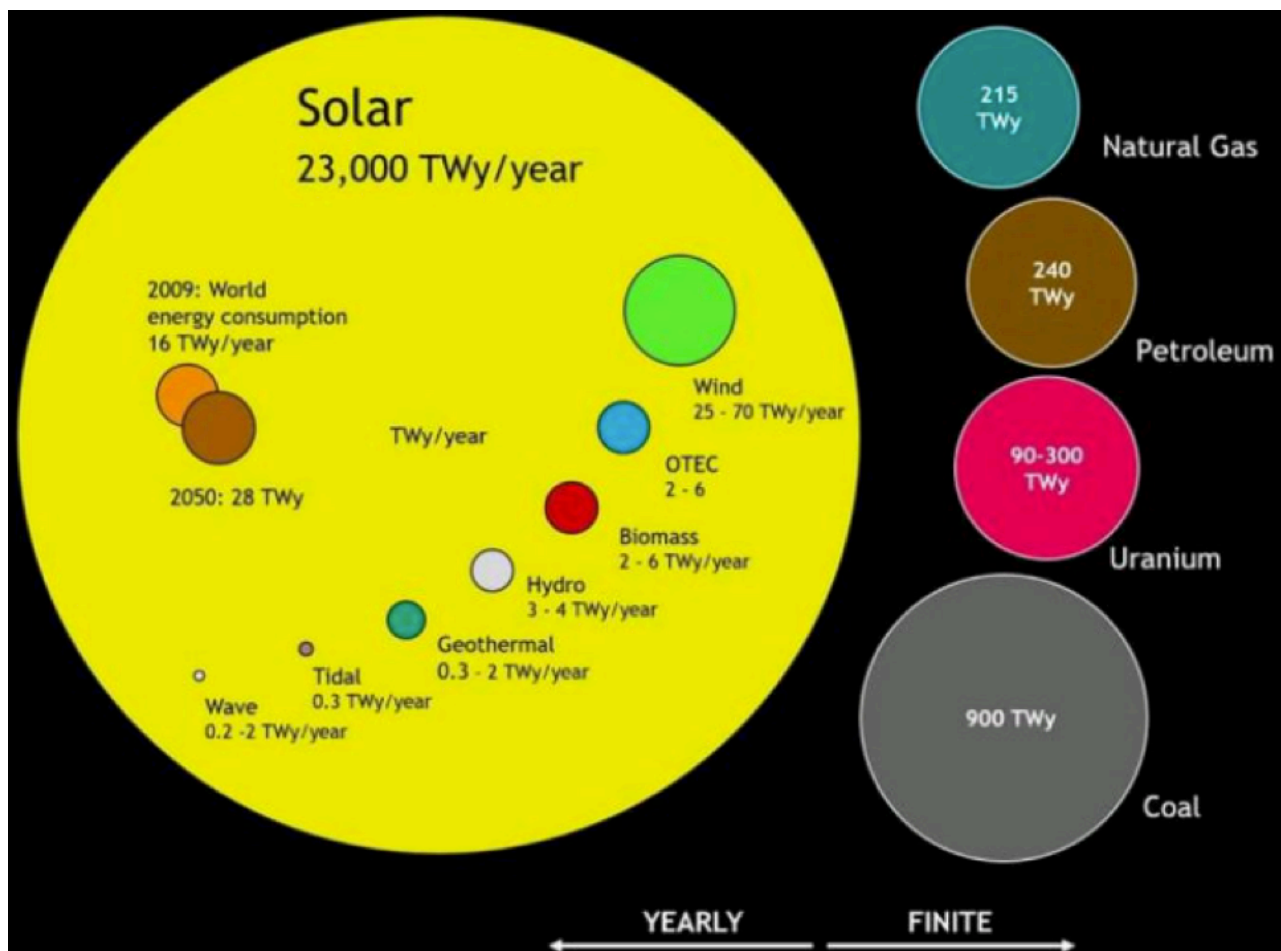


Figura 1. Comparación de reservas de energía planetaria renovables y finitas. Fuente: [10]

Transformar nuestro sistema energético actual hacia uno basado en tecnologías que utilizan fuentes de energía renovable es algo vital para la estabilización del clima en nuestro planeta [11]. Aunque en los últimos años se viene dando una imparable transición energética global sin precedentes para asegurar la estabilidad climática, ésta no lleva el ritmo necesario para cumplir con el Acuerdo de París; negociado en la 21ª Conferencia de las Partes (COP21) en 2015 [9].

Según Child et al. [12], una transición energética realmente sostenible, además de estar compuesta por una combinación de cambios tecnológicos para optimizar el uso de la energía y reducir las emisiones de GEI, deberá estar compuesta por un mercado energético que opera de manera local, descentralizada y participativa. Una vía que podría cumplir con dichas premisas es una transición hacia un sistema energético 100 % basado en fuentes renovables; es decir, lograr un sistema energético completamente desfosilizado. De hecho, una transición global hacia un sistema energético completamente desfosilizado para el año 2050, sería técnicamente factible y económicamente viable; lo cual, además, sería compatible con el objetivo climático asociado a evitar superar los 1,5 °C de temperatura media global [13].

El diseño y modelado de sistemas energéticos 100 % renovables es un tema reciente en el contexto científico [14]. En particular, este es el caso del diseño de sistemas que contemplan a todos los sectores energéticos (eléctrico, térmico y transporte), el cual ha cobrado mayor atención en la segunda mitad de la década pasada [14]. El modelado de sistemas energéticos 100 % renovables ha sido aplicado a diferentes escalas de manera aislada o independiente: una casa [15], un distrito [16], a nivel nacional [17], regional [18], continental [19] y global [20]. Sin embargo, aún se requiere estudiar cómo se puede llevar a cabo una transición energética realmente sostenible, particularmente, a escala nacional y sub-nacional, y que tenga una repercusión global [14]. Sobre todo, este tipo de estudios son necesarios debido a que una transición energética no solo depende de una revolución tecnológica, sino que también de una combinación de cambios económicos, políticos, institucionales y socioculturales [21] que afectan de distinta manera, pero interdependiente, en función de la escala geográfica en la que se apliquen.

Con independencia de la escala territorial del modelado de una transición energética sostenible, la energía solar en cualquiera de sus formas aprovechables resulta ser clave. Según Breyer et al. [22], a medio y largo plazo se espera que la energía solar, considerando todas sus posibles aplicaciones, sea la fuente de suministro de energía más importante del planeta. Sin embargo, hasta el momento no se ha logrado un consenso sobre el nivel de contribución de las distintas aplicaciones de la energía solar en el mix energético para lograr el objetivo climático acordado en la COP21 [22].

No obstante, las proyecciones muestran que la tecnología fotovoltaica (FV) jugará un papel protagonista y clave en el impulso de la transición energética global [23–26]. Prueba de ello es que, en 2020, la tecnología FV fue la que más se instaló en el mundo alcanzando los 760 GWp [27]. A su vez, se espera que la tecnología FV alcance la llamada era de los Teravatio (superar 999 GW de capacidad global instalada) entre 2022-2023 [28]. Además, por cuarto año consecutivo, ha sido la tecnología que más empleos ha generado, contribuyendo con 3,8 millones de los 11,5 millones de empleos que brindaron las energías renovables en 2019; lo que corresponde a un 33 % de los empleos creados en ese año [29].

La energía solar FV es lo suficientemente madura como para impulsar el futuro sostenible que se necesita [30]. En 2020, la energía solar FV contribuyó a evitar la emisión de 877 millones de toneladas de CO_{2eq} [27]. Además, según Victoria et al. [30], se espera que la energía solar FV continúe avanzando en su curva de aprendizaje y, por tanto, reduciendo su coste. Se espera por tanto que la energía solar FV se convierta en la principal tecnología de suministro de energía primaria [13,31].

La Tabla 1 muestra los resultados asociados a la participación de la energía solar FV en la generación de electricidad y creación de empleos directos en el año 2050 que fueron obtenidos por una prospectiva realizada por Ram et al. [32], a diferentes escalas territoriales. Este estudio modeló un escenario de transición desde un enfoque global para obtener un sistema energético 100 % renovable en todos los sectores (eléctrico, térmico, transporte y desalinización) que es compatible con los objetivos climáticos acordados en la COP21. En la Tabla 1 se puede ver que la contribución total de la tecnología FV en la generación de electricidad varía entre 39–76 %, según la escala territorial empleada para el análisis. También se puede ver en dicha tabla que la contribución de los prosumidores FV (consumidores de electricidad que pueden producirla para su auto-consumo e inyectar sus excedentes a la red de distribución) varía entre 9–12 % según la escala territorial.

Algo similar a lo descrito en el párrafo anterior ocurre con la participación de la FV en la creación de empleos. Tanto el total de empleos creados por la tecnología FV como los empleos creados por los prosumidores FV varía según la escala territorial bajo análisis, aunque, en este caso, estos resultados están solo para el sector eléctrico; es decir, está excluida la creación de empleos que implicaría la generación FV para suplir la demanda eléctrica de los sectores térmico, transporte y desalinización.

Tabla 1. Participación de la energía solar FV en la generación de electricidad y creación de empleos directos a diferentes escalas para el año 2050. Fuente: [Elaboración propia]

Escala	Porción FV en generación		Porción FV en empleos	
	Total	Prosumidores	Total	Prosumidores
Mundial	73 %	11 %	64 %	36 %
Continental (América del Sur)	76 %	9 %	57 %	37 %
Nacional (Chile)	39 %	12 %	n.i. ⁱ	n.i. ⁱ

ⁱ No informado.

Los resultados de Ram et al. [32] revelan que cuando se modela una transición energética desde un enfoque global, la contribución de una tecnología específica varía según la escala territorial. Es decir, aunque existen herramientas para modelar una transición energética con miras a cumplir los objetivos climáticos acordados en la COP21 (herramientas que a su vez permiten analizar el potencial y el rol de diferentes energías renovables, así como también permiten definir estrategias y planes de implementación), se ha detectado que modelar desde un enfoque global, probablemente lleve a obtener resultados diferentes que los que se obtengan desde un enfoque local.

En el modelado desde un enfoque global, un país se considera como un solo nodo consumidor de energía ubicado en un punto geográfico de su territorio, a partir del cual se obtienen resultados a nivel nacional. Luego, estos resultados a nivel nacional se suman para obtener resultados a nivel continental, y luego, estos últimos se suman para obtener los resultados a nivel global.

En cambio, en el modelado de transición energética desde un enfoque local, un país se subdivide en varios nodos de consumo de energía repartidos a lo largo y ancho de su territorio. Aquí, los resultados se obtienen primero a nivel sub-nacional y, al sumarlos, se consiguen resultados a nivel nacional. En este sentido, no se ha encontrado en la literatura análisis comparativos del modelado de una transición energética desde un enfoque global y local para un mismo país.

Por lo tanto, cabe preguntarse si los resultados de la participación de una tecnología específica para un país, obtenidos desde un enfoque global, serán los mismos que si se realiza el modelado de transición energética desde un enfoque local. Esta es la principal interrogante que esta tesis doctoral busca responder, utilizando para ello un análisis basado en la tecnología FV.

Particularizando en el caso de la tecnología FV, su carácter modular permite que el análisis de transición energética desde un enfoque local pueda arrojar resultados más fiables. En este contexto, la figura del prosumidor puede jugar un rol significativo respecto a su contribución para un país. Esta contribución puede adquirir mayor importancia aún, sabiendo que los prosumidores FV se localizan en las ciudades. Esto cobra especial sentido si se considera que la contaminación del aire sigue siendo una amenaza mortal en muchas ciudades [33] y que la tecnología FV descentralizada puede ayudar a revertir esta situación. De hecho, las ciudades son uno de los sistemas sociales más energético intensivos, ya que consumen tres cuartos de la demanda mundial de energía final; lo que las hace responsables del 75 % de las emisiones globales de CO₂ correspondientes al sector energético [34]. Además, las ciudades son responsables de problemas a la salud de la población. Según el informe sobre la calidad del aire en el mundo [35], el 92% de la población mundial respira aire tóxico, la mayor parte del cual se encuentra en ciudades de países menos desarrollados.

En resumen, los prosumidores FV, que en esta tesis doctoral se denominan sistemas solares FV descentralizados (SSFVD), pueden desempeñar un papel importante en la aceleración de una transición hacia un sistema energético sostenible, particularmente en las ciudades [15]. Esto permitiría a los ciudadanos ayudar en la desfosilización a través de una transición energética más descentralizada y participativa, obteniendo beneficios socioeconómicos y socio-ambientales basados en la tecnología solar FV. Sin embargo, según Couture et al. [36], aún no existe una revolución de prosumidores FV debido a la falta de políticas habilitadoras. Tanto los formuladores de políticas como los planificadores deben apreciar cómo los prosumidores FV pueden convertirse en competidores en el mercado de la electricidad al diseñar estrategias presentes y futuras [37]. Esto debería darse, sobretudo, en países en vías de desarrollo; por ejemplo, en América del Sur, donde el potencial de los SSFVD está infra-explotado [38].

Por lo tanto, por una parte, considerando la importancia de entender cómo llevar a cabo una transición energética sostenible desde un enfoque local, pero con repercusión global, y por otra, asumiendo que la energía solar FV jugará un papel significativo en dicha transición, en esta tesis doctoral, enmarcada en la línea de investigación sobre planificación, gestión y aspectos socioeconómicos de las energías renovables, se ha utilizado como caso de estudio a Chile y la región de Aysén. Esto, con el propósito de llevar a cabo un análisis comparativo sobre el rol que la energía solar FV descentralizada podría jugar en la transición energética sostenible, cuando el modelado de transición se realiza tanto desde un enfoque global como local para un mismo país.

Chile es un país en vías de desarrollo que cuenta con características únicas y peculiaridades algo contradictorias que lo convierten en un interesante caso de estudio, al igual que la región de Aysén (ver Sección 2.5 de este documento). Tanto Chile como la región de Aysén reflejan la mayoría de los problemas energético- y socio-ambientales globales provocados por la crisis del Antropoceno, pero a su vez, también cuentan con oportunidades para implementar soluciones basadas en el enorme potencial de energías renovables distribuido a lo largo del territorio. Esto permite estudiar desde distintos enfoques de modelado energético las diferencias que puedan surgir en función de la escala territorial bajo análisis.

1.2 Motivación, hipótesis y objetivos

Contribuir al desarrollo de un sistema energético que asegure la estabilidad climática del planeta es uno de los desafíos más importantes de la primera mitad de este siglo [11]. Por ello, la motivación principal que hay detrás de esta tesis doctoral es realizar un aporte científico que contribuya al proceso de transición hacia sistemas energéticos sostenibles y en consonancia con los objetivos climáticos acordados en la COP21. En este contexto, una de las alternativas que permitiría superar el desafío climático es llevar a cabo una transición hacia sistemas energéticos basados 100 % en fuentes renovables [13,32,39,40]. Sin embargo, el diseño de sistemas 100 % basados en energías renovables que consideran todos los sectores que consumen energía es relativamente reciente [14].

Aunque existen herramientas para modelar una transición energética con miras a cumplir los objetivos climáticos acordados en la COP21 y diseñar vías para lograr sistemas 100% basados en fuentes renovables, por una parte, se ha detectado que modelar desde un enfoque global, esto es, obtener resultados a nivel nacional desde una análisis mundial, probablemente lleve a obtener resultados diferentes que los que se obtengan desde un enfoque local, es decir, resultados a nivel nacional desde un análisis sub-nacional; por ende, las conclusiones que se obtengan pueden producir confusión para los tomadores de decisiones. Por otra parte, no se ha encontrado en la literatura análisis comparativos del modelado de una transición energética desde un enfoque global y local para un mismo país.

La variación de los resultados del modelado de transición energética desde un enfoque global con respecto a los de un enfoque local, depende de múltiples factores que son propios del contexto (geográfico, climático, político, regulatorio, económico, técnico, social, entre otros) de cada territorio bajo análisis. En este sentido, se torna necesario adaptar herramientas de modelado de escenarios energéticos desde un enfoque global a uno local, con el propósito de generar nuevo conocimiento que además de permitir analizar el rol de diferentes energías renovables, permitiría definir estrategias y planes de implementación para llevar a cabo la transición energética que se requiere.

A su vez, la tecnología solar FV cuenta con excelentes características para contribuir en la electrificación de todos los sectores y a distintas escalas, así como también, esta tecnología puede brindar beneficios socio-ambientales y socio-económicos a escala local. Por lo tanto, fundamentado en el hecho de que esta tecnología jugará un papel clave en las transiciones energéticas de la mayoría de los países, es necesario discernir si el rol de la energía solar FV descentralizada en el panorama de la transición energética sostenible es el mismo desde un enfoque global que desde un enfoque local, para un mismo país.

En función de lo expresado anteriormente, como **hipótesis de partida** de esta tesis doctoral se plantea que:

el análisis de una transición energética sostenible desde un enfoque local revela un rol y un impacto de la tecnología solar FV descentralizada más significativo que el de un análisis desde un enfoque global.

En ese sentido, el **objetivo general** de este trabajo de investigación es analizar el rol que la energía solar FV descentralizada podría jugar en la transición energética sostenible de Chile y la región de Aysén.

Para llevar a cabo el objetivo general, el trabajo de investigación se ejecutó en el marco de los siguientes **objetivos específicos**:

- 1) Identificar barreras y oportunidades asociadas a la implementación de la tecnología solar FV descentralizada en Chile y la región de Aysén.
- 2) Identificar criterios, factores e indicadores asociados a los sistemas solares FV que están siendo utilizados en la planificación energética a escala local.
- 3) Modelar escenarios de transición energética hacia un sistema 100 % basado en energías renovables para Chile, usando diferentes enfoques de aplicación.

1.3 Estructura de la memoria

La memoria de esta tesis doctoral se estructura de la siguiente manera. En la Sección 2, a modo de contextualización de la investigación desarrollada, se profundiza en los siguientes tópicos: i) importancia de un cambio en el sistema energético global; ii) acciones necesarias hacia sistemas energéticos sostenibles; iii) estado del arte sobre el modelado de sistemas energéticos 100 % renovables; iv) estado actual y rol de la energía solar FV en los escenarios energéticos globales a largo plazo; v) Chile y la región de Aysén como caso de estudio para una transición energética sostenible, y; vi) situación actual de la energía solar FV en Chile y sus proyecciones a largo plazo.

En la Sección 3 se presenta una descripción general de la metodología que se utilizó para lograr la consecución de los objetivos de este trabajo de investigación.

Posteriormente, en la Sección 4 se presentan y discuten los resultados de esta investigación, que han tenido su relevancia científica gracias a su publicación en seis artículos que respaldan esta tesis doctoral.

Finalmente, en las Secciones 5 y 6 se exponen las conclusiones del trabajo realizado, así como las nuevas líneas de investigación que se han identificado en el marco de este trabajo, respectivamente.

2. Contextualización

2.1 Importancia de un cambio en el sistema energético global

Según los numerosos estudios existentes procedentes de diferentes áreas del conocimiento, es imperativo evitar superar los 1,5 °C de temperatura media global para detener los diversos y severos impactos negativos sobre nuestro planeta [41–51]. La mayoría de esos severos impactos serían una consecuencia del cambio climático, el cual, está siendo causado por una acumulación de emisiones antropogénicas de GEI [2].

Debido a que el sector energético es el responsable del 73,2 % de las emisiones globales de GEI [52] (ver Figura 2), es vital llevar a cabo una transformación del sistema actual [53,54] y una desfosilización profunda en todos los sectores energéticos [11,55–57], así como también es fundamental restringir la producción de combustibles fósiles [58]. Todas estas acciones también son necesarias para revertir los impactos ambientales negativos que afectan a nivel local, tales como la contaminación del aire y el suelo [59] y, el consumo de agua en centrales térmicas [60]. Todo lo anterior, afecta también a la seguridad alimentaria, ya que está directamente relacionada bajo el nexo agua-energía [61].

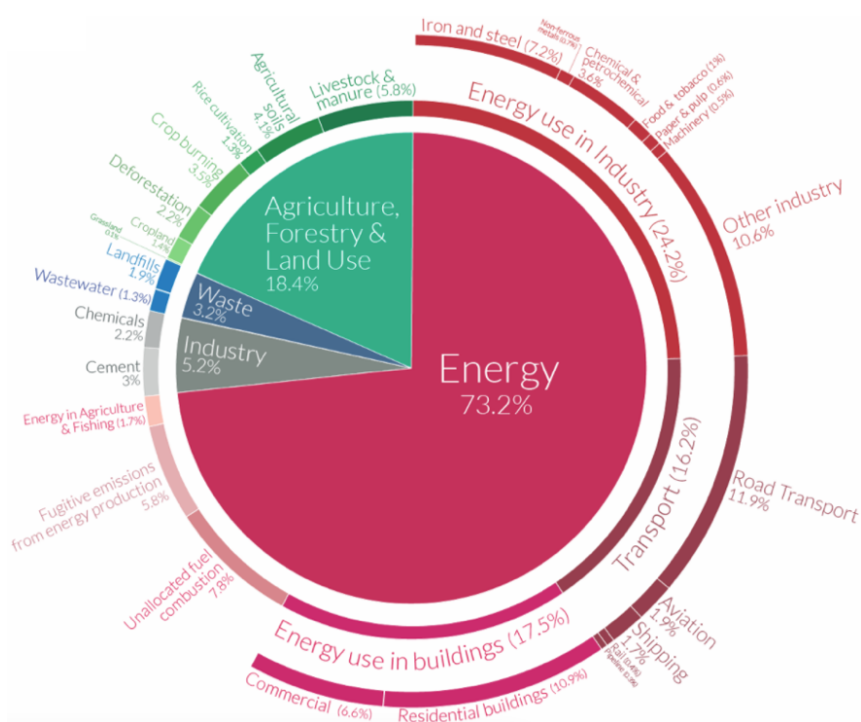


Figura 2. Emisiones globales de gases de efecto invernadero por sector, año 2016. Fuente: [8]

Para estabilizar el Sistema Tierra (entendiendo el Sistema Tierra como la totalidad de los procesos físicos, químicos, biológicos y humanos en interacción dentro de nuestro planeta) y alejarlo de un umbral sin retorno, se requiere una acción humana radical y colectiva [62–65]. Sin embargo, bajo los actuales procedimientos de nuestras actividades, el aumento de 1,5 °C en la temperatura media global se podría alcanzar entre 2030 y 2052 [5]. A su vez, también existe una brecha en la reducción de emisiones de GEI globales para lograr cumplir con los objetivos climáticos acordados

en la COP21 [66]. Esto se debe a que la respuesta de cada país al cambio climático hasta el momento es insuficiente para dichos fines [67]. Si bien está aumentando el número de países que anuncian objetivos de emisión neta cero de GEI para 2050, hasta ahora solo unos pocos han presentado formalmente estrategias a largo plazo para lograrlo [66].

Por otro lado, existe una brecha de producción. Esto significa que a nivel mundial se está planeando al 2030 producir un 53 % más de combustibles fósiles de lo que sería consistente con un escenario para mantener una temperatura media global por debajo de 2 °C, y un 120 % más de lo que sería consistente con un escenario de 1,5 °C [58]. En otras palabras, aunque muchos países planean reducir sus emisiones de GEI, algunos de ellos están señalando lo contrario cuando se trata de planes de producción de combustibles fósiles.

La desfossilización del sector energético y la economía a nivel mundial requerirá cambios estructurales que sean radicales [20,68,69]. Esto debe diseñarse para traer múltiples beneficios al sistema humano-planeta [66,70] y, en consecuencia, también para la biosfera y la resiliencia climática [71]. En este sentido, la eficiencia energética y las tecnologías de energía renovable, en combinación con la electrificación de los servicios energéticos y usos finales, han sido identificados como elementos vitales para una transición energética exitosa; por ejemplo, para reducir en 2050 el 94 % de las emisiones de GEI relacionadas con el sector energético [72].

En resumen, la transición hacia una profunda desfossilización en todos los sectores energéticos implica acciones esenciales para cumplir los objetivos climáticos globales. Según Wei et al. [73], habría pérdidas económicas importantes como resultado de la falta de acción climática de las actuales Contribuciones Nacionalmente Determinadas (NDC, por sus siglas en inglés) y, al contrario, se obtendrían enormes ganancias económicas globales a partir de compromisos climáticos fortalecidos, los cuales están directamente relacionados con una transición energética sostenible. Esto, además de asegurar la estabilidad del clima a nivel global, permitiría incrementar el crecimiento interno bruto de cada país, a la vez que brinda beneficios socio-ambientales y socioeconómicos. Estos mismos autores proponen que cada país siga una estrategia climática para cumplir los acuerdos internacionales, ya que implicaría que todos los países puedan tener un ingreso neto acumulado positivo y significativo antes de 2100, como resultado de la aceleración de la conversión tecnología para reducir las emisiones de GEI [73].

Sin embargo, como comunidad global, todavía estamos lejos de estar en el camino correcto para alcanzar esos objetivos y beneficios. Según la REN21 [74], excluyendo el uso tradicional de biomasa, en 2018 la participación mundial de las energías renovables en el consumo total de energía final fue de un 11 % (ver Figura 3). En el reporte de la REN21 también se destaca que el progreso hacia la implementación de tecnologías de energía renovable se ha producido principalmente en el sector eléctrico. Aunque la electricidad renovable ha venido experimentando un fuerte crecimiento, no está siendo suficiente para cubrir los aumentos de la demanda de energía final [74]. De hecho, debido a la creciente demanda de energía y la falta de adopción de las energías renovables en todos los sectores, el apoyo a los combustibles fósiles ha continuado. Por lo tanto, el progreso hasta ahora realizado por las energías renovables no ha sido lo suficientemente rápido como para competir con la creciente demanda de energía que se ha dado anualmente. En consecuencia, las emisiones mundiales de GEI han seguido aumentando [66].

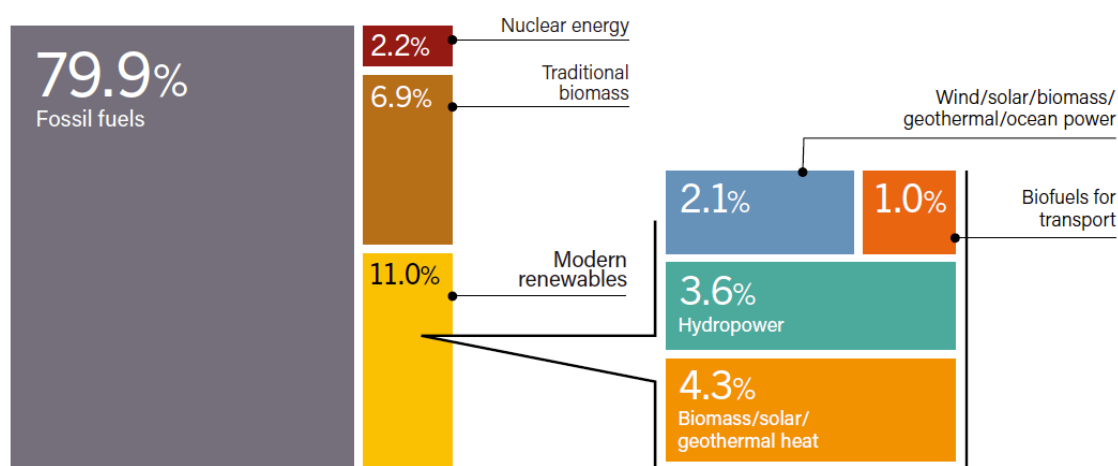


Figura 3. Participación estimada de renovables en el consumo global de energía final en 2018.

Fuente: [74]

Incrementar el suministro de energía proveniente de fuentes renovables en todos los sectores es crucial para habilitar la transformación hacia un sistema energético bajo en emisiones de GEI; con el que se podrían lograr los objetivos climáticos de la COP21 y los objetivos de desarrollo sostenible [9]. Sin embargo, acelerar la transición energética depende principalmente de las políticas climáticas de un país. Esto está directamente relacionado con las NDC para 2030 y el compromiso de lograr la neutralidad en las emisiones de carbono para el 2050. Esto significa que hasta ahora no se han considerado, a nivel político, sistemas energéticos basados 100% en fuentes renovables para cubrir el consumo de energía final de todos los sectores.

De hecho, según la Agencia Internacional de Energía (IEA, por sus siglas en inglés) [75], se necesitan más esfuerzos en las tecnologías que serán claves (almacenamiento de energía, hidrógeno verde, redes inteligentes, captura directa CO₂ desde la atmósfera, entre otras) para avanzar hacia el acoplamiento de los sistemas energéticos y la producción de combustibles sostenibles (también llamados combustibles neutrales en carbono, combustibles sintéticos o *e-fuels*). En otras palabras, aún se necesita avanzar hacia los sistemas energéticos que como especie humana nos permitirían evitar elevar la temperatura media del planeta a niveles que producirían impactos catastróficos no reversibles; así como también, estos sistemas energéticos nos permitirían mantener nuestras actividades cotidianas de una manera verdaderamente sostenible.

2.2 Acciones necesarias hacia sistemas energéticos sostenibles

De acuerdo con Child et al. [12], una transición hacia sistemas energéticos sostenibles debe cumplir con una serie de criterios que se enmarcan dentro de los tres aspectos que conforman la definición de sostenibilidad. La Tabla 2 expone esos tres aspectos con sus respectivos criterios. Según estos autores, esto se puede lograr mediante algunas características relacionadas con el ámbito de la oferta y la demanda de energía que deberían adoptar los sistemas energéticos a nivel nacional y sub-nacional. Por ejemplo: ganancias de eficiencia; flexibilidad por medio de la interacción de altos porcentajes de generación de electricidad renovable con capacidades de almacenamiento y transmisión de las redes eléctricas y el acoplamiento de los sectores; producción de combustibles sostenibles; captura y almacenamiento de CO₂ desde la atmósfera, y; desalinización de agua de mar basada en energías renovables.

Tabla 2. Aspectos y criterios que definen una transición hacia sistemas energéticos sostenibles.
Fuente: [12]

Aspectos	Criterios
Ambiental	• Esfuerzos para reducir la emisión de GEI bajo una vía compatible con el escenario de 1,5 °C • Protección de los ecosistemas marinos y terrestres • Protección de ríos y cuencas hidrográficas limitando las grandes centrales hidroeléctricas • Reducción del uso de agua dulce
Económico	• Utilización de los recursos de forma descentralizada y eficiente • Reducción del riesgo de volatilidad del precio del combustible • Modelo de mercado energético descentralizado y participativo • Promoción de la prosperidad económica basada en la energía como motor de desarrollo local
Social	• Reducción de los impactos negativos en la salud producidos por la contaminación del aire a nivel local • Evitar los riesgos de accidentes nucleares, vertederos de desechos y eliminación a largo plazo • Reducción de los conflictos geopolíticos por el uso de recursos • Proyectos energéticos con aceptación social

Por lo tanto, un sistema energético sostenible que cumpla con dichos criterios deberá estar compuesto por una combinación de: cambios tecnológicos y mejoras de procesos orientados a optimizar el uso de la energía; tecnologías basadas en fuentes de energía renovable y; un mercado energético que opera de manera local, descentralizada y participativa. En este sentido, se pueden reconocer las siguientes tendencias que se están dando globalmente: eficiencia energética; altos niveles de electrificación en todos los sectores; prosumerismo y participación ciudadana en el sistema energético; almacenamiento de energía y acoplamiento de sectores, y; producción de combustibles basados en energías renovables.

Eficiencia energética

Disminuir la intensidad del consumo de energía a través del incremento de la eficiencia es una de las principales acciones que se están llevando a cabo a nivel mundial para el logro de los objetivos climáticos y de sostenibilidad [76]. La eficiencia energética es un tema clave entre los miembros del G20, ya que representan más del 80% de la producción económica mundial, el consumo de energía primaria y las emisiones de GEI [77].

Los esfuerzos asociados a la eficiencia energética se han estado centrando principalmente en: reducir el uso de energía por metro cuadrado en las edificaciones; cambiar procesos y máquinas en la industria y el transporte, y; gestionar los consumos de energía fuera de las horas punta y en momentos del día en que la demanda puede ser cubierta directamente por la energía solar.

Uno de los objetivos de desarrollo sostenible planteados por las Naciones Unidas está orientado a duplicar la tasa de mejora de la eficiencia energética a nivel mundial para el año 2030 [77]. Según el escenario de desarrollo sostenible de la IEA que muestra cómo encaminar al mundo para lograr los objetivos climáticos internacionales, la eficiencia energética produciría más del 40% de la reducción de las emisiones de GEI relacionadas con la energía durante los próximos 20 años [76].

Altos niveles de electrificación en todos los sectores

A diferencia de los bajos niveles actuales de electrificación en los sectores térmico y transporte (ver Figura 4), todos los escenarios energéticos globales proyectados al 2050 coinciden en que la electrificación en estos sectores es clave para lograr los objetivos climáticos [13]. En ambos sectores se está avanzando en una electrificación directa e indirecta.

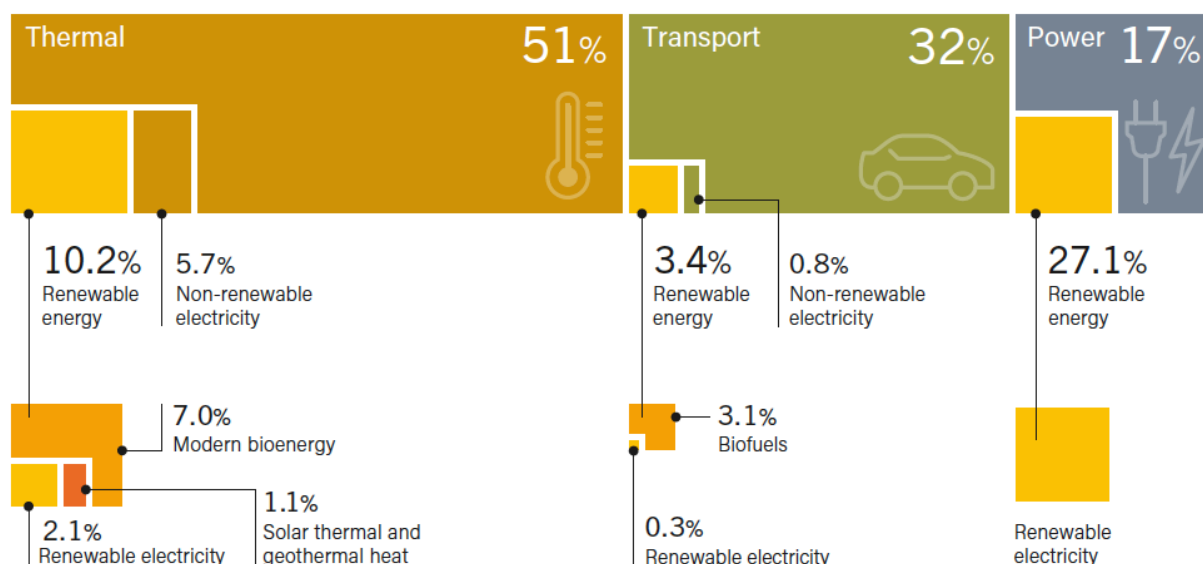


Figura 4. Participación de renovables en el consumo global de energía final por sector en 2018.

Fuente: [9]

En el caso del sector térmico, la calefacción/refrigeración por electrificación directa se basa en calefactores y sistemas de aerotermia y, de forma indirecta, a través de bombas de calor y almacenamiento de electricidad como energía térmica [78].

En el caso del sector transporte, la electrificación directa se está dando en la mayoría de las formas de movilidad: desde patinetas, bicicletas, motocicletas, automóviles, buses, camiones, trenes, botes, ferris y hasta aviones de tramos cortos; mayoritariamente, esta electrificación directa está proyectada para vehículos de carga liviana y media [79]. La electrificación indirecta en el sector transporte se basa en los denominados *e-fuels*, los cuales forman parte de los combustibles sustentables que se producen basados en el concepto Potencia a X (en inglés, *Power-to-X (PtX)*) [80].

De hecho, el concepto *PtX* –transformar la electricidad en otras sustancias útiles– engloba todos los sectores energéticos, y más. Por ejemplo, existen las opciones con fines energéticos conocidas como *Power-to-Heat (PtH)*, *Power-to-Gas (PtG)*, *Power-to-Liquid (PtL)*, *Power-to-Hydrocarbons*; pero también existen opciones tales como *Power-to-Water* y *Power-to-Chemicals*.

Para todo lo anterior, las tecnologías de generación de electricidad renovable son clave. De hecho, según los resultados obtenidos por Bogdanov et al. [13], en el que se lograría un sistema energético global 100 % renovable y compatible con los objetivos climáticos acordados en la COP21, la transición en los sectores eléctrico, térmico, transporte y desalinización, está impulsada por una electrificación masiva (directa e indirecta) que supondría suministrar un 89 % de la energía primaria en 2050.

Participación ciudadana y prosumerismo en el sistema energético

Soutar y Mitchell [81] describen dos narrativas de la participación social en los sistemas energéticos que ilustran al menos los polos de lo que es más probable que se continúe dando en el mercado de la energía. El primero implica sistemas energéticos centralizados con consumidores que tienen poco o ningún nivel de participación en la energía que utilizan o en los recursos utilizados para producirla, lo que se denomina "visión de consumidor". Para estos consumidores, la energía es un bien abstracto que no se contempla mucho más allá de los servicios energéticos que se le proporcionan o de las facturas que se pagan por ellos. No existe una conciencia o preocupación por los recursos energéticos y su origen, o en la responsabilidad de los procesos de producción y la posible contaminación asociada. En este sentido, la energía se considera un bien público proporcionado por las infraestructuras jerárquicas y los modos de gobernanza *top-down*.

Por otro lado, Soutar y Mitchell [81] describen la "visión de la ciudadanía energética", la cual muestra una mayor adopción de tecnologías energéticas asequibles y bajas en carbono para una gama más amplia de propietarios (comunidades, municipios, empresas, hogares, etc.), que se distribuyen geográficamente y, con mayor frecuencia, explotan recursos de energías renovables variables. En este caso, destaca que el nuevo compromiso con la energía implica una conciencia mucho mayor de su origen, el método de producción y distribución, así como sus impactos ambientales locales. Esta visión conlleva un cambio notorio en la gobernanza energética de lo central a lo local, lo que resulta en la democratización del sistema energético [81].

Esta visión supone que se puedan crear o expandir oportunidades comerciales a nivel local, apoyando una economía más circular. Debido a que esta tendencia hacia una ciudadanía energética se caracteriza por la explotación de recursos energéticos renovables distribuidos y variables, equilibrar el consumo y la generación de energía pasa a ser responsabilidad de un mayor número de actores, para lo cual se necesita flexibilidad en la demanda en redes más locales y pequeñas. Aquí, emerge la figura de los consumidores de energía que al mismo tiempo tienen la capacidad de ser productores; a los cuales se les denomina prosumidores [82,83].

Dentro de los prosumidores de energía eléctrica, se tiene a los clientes residenciales, públicos, comerciales e incluso industriales que instalan sistemas solares FV en sus tejados. Eso está en línea con la visión de Ruotsalainen et al. [84] sobre los sistemas energéticos del futuro, ya que estos pueden llegar a experimentar una gran abundancia de energía descentralizada y de menor costo como resultado de las redes *peer-to-peer*. Así, al menos parte de la generación de electricidad centralizada puede ser reemplazada por la generación distribuida, basada en la tecnología FV. En resumen, la presencia de prosumidores indica que hay movimiento desde el suministro de energía más tradicional y centralizado hacia uno descentralizado.

Almacenamiento de energía y acoplamiento de sectores

A medida que aumenta la proporción de energía renovable variable en los sistemas energéticos, se incrementa la necesidad de almacenamiento a corto y largo plazo. Varios trabajos han demostrado que una vez que la participación de las energías renovables en la generación electricidad alcancen aproximadamente el 50%, la necesidad de almacenamiento de energía eléctrica se hace evidente y, cifras de una participación del 80%, implica que sea necesario un almacenamiento estacional [85–87].

En el pasado, el concepto de almacenamiento de energía estuvo dominado por el suministro flexible de energía hidroeléctrica, el uso de almacenamiento de agua por bombeo y, en algunos casos, por el almacenamiento de energía térmica. Además, la naturaleza de algunos recursos energéticos, como los combustibles fósiles y la biomasa, significó que el almacenamiento de los portadores de energía, como la eléctrica y térmica, no siempre fuese necesario.

La flexibilidad en los sistemas energéticos apareció cuando los recursos energéticos se transformaron en portadores de energía, lo cual fue, más o menos, bajo demanda. Por lo tanto, si los sistemas de energía del futuro van a utilizar una alta proporción de energías renovables variables, se debe aprovechar la flexibilidad para mantener el equilibrio entre la oferta y la demanda a corto plazo (horas y días) y a largo plazo (estacional). En este sentido, varias formas de almacenamiento de energía han surgido como candidatos potenciales para proporcionar dicha flexibilidad.

A nivel mundial, el almacenamiento de baterías eléctricas se ha convertido en una tecnología clave en la transición hacia la sostenibilidad [88]. Las aplicaciones de baterías estacionarias han comenzado a crecer rápidamente. Además, se espera un despliegue más amplio impulsado por extensiones de vida útil, mejoras de rendimiento y reducciones de costos en baterías de iones de litio, sodio-azufre de alta temperatura y baterías de flujo [88]. A medida que las fábricas de baterías crecen en escala para satisfacer la demanda de vehículos eléctricos, existe la posibilidad de que las baterías tengan un impacto importante en los sectores de la electricidad y el transporte.

Adicionalmente, un concepto que aparece como consecuencia del almacenamiento y la flexibilidad, con el objetivo de aportar versatilidad y sinergias al sistema energético, es el acoplamiento entre los sectores [89]. A una escala más local (ciudad, barrio y/o edificio), la tendencia es hacia un grado de sofisticación mayor entre la interacción del almacenamiento de energía y el acoplamiento de los sectores; estos vienen a ser los denominados sistemas energéticos inteligentes [90]. En cualquier caso, el concepto *PtX*, también jugará un importante papel en los sistemas energéticos sostenibles, en términos de flexibilidad y acoplamiento de sectores.

Producción de combustibles basados en energía renovable

La producción de combustibles seguirá siendo importante en los sistemas energéticos del futuro. No obstante, existe una clara tendencia promoviendo la migración de combustibles fósiles a combustibles sustentables; es decir, basados en energías renovables. En este sentido, se reconocen los biocombustibles [91], los *e-fuels* (basados en *PtX*, ver Figura 5) [92] y los combustibles solares [93].

aprobado leyes para alcanzar el 100 % de electricidad renovable a más tardar el 2050; y más de 280 empresas internacionales se han comprometido con el 100% de las energías renovables en todas sus operaciones globales [96]. Sin embargo, solo Dinamarca ha aprobado leyes para alcanzar un sistema energético 100 % basado en energías renovables al 2050 en todos los sectores [96].

2.3 Estado del arte sobre el modelado de sistemas energéticos 100 % renovables

Uno de los aspectos fundamentales para cumplir con los objetivos climáticos acordados en la COP21 es trazar vías de transición energética orientadas a reemplazar los sistemas basados en combustibles fósiles y finitos por sistemas que utilizan fuentes de energía renovable. En este contexto, las herramientas de modelado de sistemas energéticos cobran un importante papel, ya que, estas sirven para diseñar y explorar diferentes opciones y escenarios futuros que analicen y propongan las vías de transición energética más factibles y viables en términos técnicos y económicos de un determinado país promotor.

En la comunidad científica, la investigación en torno al diseño de sistemas energéticos 100 % renovables es reciente, pero ha recibido una atención cada vez mayor en la última década [14]. Este tipo de investigación se ha llevado a cabo principalmente a través de un análisis para el sector eléctrico y desde una perspectiva técnica [14]. En cualquier caso, la mayoría de los estudios concluyen que un sistema eléctrico 100 % renovable es tecnológicamente factible [14], y también, económicamente viable [97–99].

En la última mitad de la década pasada ha emergido el interés por el modelado de sistemas energéticos 100 % renovables a diferentes niveles o escalas; desde el hogar [15], el distrito [16], el nacional [17], el regional [18], el continental [19] y el mundial [20]. Estos estudios no relacionan los resultados entre las distintas escalas aplicadas. Algunos estudios [100–103] a nivel país sobre sistemas energéticos 100 % renovables para todos los usos finales de energía, han revelado que sería técnicamente factible a largo plazo, donde, todos concluyen que la electrificación, el acoplamiento de sectores y la producción de combustibles sustentables será esencial. Sin embargo, todavía hay una discusión sobre los caminos a seguir para lograr una transición hacia un sistema energético totalmente sostenible.

Los modelos con evaluación holística para escenarios más realistas con el fin de mejorar el diseño de una vía hacia la obtención de sistemas energéticos sostenibles [104,105] apenas están comenzando. De hecho, Hansen et al. [14], por un lado, destacan la necesidad de profundizar en investigaciones sobre sistemas energéticos 100 % renovables en todos los sectores; especialmente, sobre las vías de transición energética para una mejor comprensión sobre la manera de su alcance. Y, por otro lado, destacaron la necesidad de vincular el modelado energético local con el global. En este sentido, una forma coherente de encontrar vías al respecto es realizar un análisis de una muestra de países. Sin embargo, esto no estaría libre de desafíos y obstáculos que superar, especialmente en los países en desarrollo [106].

La Tabla 3 muestra los estudios en países y regiones que abordan la transición energética sostenible a nivel país. La tabla excluye los artículos que solo discuten la transición energética a nivel mundial y sub-nacional. También excluye los estudios *overnight* (que arrojan resultados de escenarios

energéticos de largo plazo sin indicar detalles durante el periodo de transición sobre cómo llegar a ellos), porque los actores y responsables de la formulación de políticas están más interesados en las descripciones de qué medidas se deben tomar, y cuándo y cómo un sistema energético podría usarse o modificarse de la mejor manera. Los estudios que describen medidas que se deben tomar en el tiempo permiten reflejar cómo lograr una transición hacia sistemas energéticos 100 % renovables en varios pasos a lo largo del tiempo, a partir de la realidad existente. La Tabla 3 solo considera estudios que incluyen –al menos– los sectores eléctrico, térmico y transporte, así como también, solo considera estudios donde la contribución de la energía solar FV a la generación de electricidad primaria en el año 2050 sea superior al 50 %.

Tabla 3. Países y regiones con análisis de vías de transición para obtención de sistemas energéticos 100 % renovables con una participación fotovoltaica superior al 50 % en el año 2050.

Fuente: [Elaboración propia]

País/región	Participación FV	Referencia
120 de 145 regiones	>50 %	Bogdanov et al. [13]
Europa	61 %	Ram et al. [95]
Sur de Europa	58–100 % ⁱ	Victoria et al. [107]
Kazakhstan	81 %	Bogdanov et al. [108]
Turkmenistan	79 %	Satymov et al. [109]
Jordan	82 %	Azzuni et al. [110]
Ethiopia	66 %	Oyewo et al. [111]
India	70 %	Lawrenz et al. [112]
Nepal, Bhutan	67 %	Gulagi et al. [113]
Philippines	97 %	Gulagi et al. [114]
Australia	72 %	Aboumahboub et al. [115,116]
México	75 %	Sarmiento et al. [117]
México	54 %	Buira et al. [118]
Bolivia	93 %	Lopez et al. [119]

ⁱ Europa modelada en múltiples nodos e interconectada, con varios países por encima del 50% de PV, mientras que toda Europa permanece por debajo del 50%; los países por encima del 50% son Portugal, España, Italia, Bélgica, Luxemburgo, Suiza, Austria, República Checa, Eslovaquia, Hungría, Eslovenia, Croacia, Bosnia-Herzegovina, Serbia, Bulgaria y Grecia.

Según lo analizado en la revisión del estado del arte, se observa que la mayoría de los enfoques de planificación energética son centralizados y se basan principalmente en herramientas de modelado energético que solo consideran aspectos tecno-económicos [120]. Por lo tanto, se torna necesario considerar criterios asociados a los aspectos ambientales y sociales de la definición de sostenibilidad, en el modelado de sistemas energéticos 100 % renovable. En cualquier caso, y basándose en las proyecciones a nivel país, queda claro que la tecnología solar FV tendrá un rol clave en la transición energética de muchas y diferentes naciones; particularmente, las que se encuentran localizadas en el cinturón solar del planeta (entre latitudes $\pm 45^\circ$), donde, justamente, se encuentra concentrada la mayor cantidad de la población mundial.

2.4 Estado actual y rol de la energía solar FV en los escenarios energéticos globales a largo plazo

En gran parte de la historia del ser humano se han desarrollado ingenios capaces de aprovechar de una u otra forma la energía del Sol, o rendir culto a él. En nuestra actual generación, la tecnología solar FV es el invento que aprovecha la energía del Sol en forma de producción eléctrica directa, que

se considera como clave para llevar a cabo una descarbonización y desfossilización en todos los sectores energéticos [23–26]. La contribución de la energía solar FV a la descarbonización del mix energético está progresando; en 2020 evitó la emisión de 877 millones de toneladas de CO_{2eq} [27]. Sin embargo, aún queda un largo recorrido para desfossilizar completamente el mix energético; para ello, el despliegue de la tecnología FV debería aumentar en al menos un orden de magnitud como para hacer frente a los objetivos definidos en la COP21 [27].

Tal como se puede ver en la Figura 6, a nivel global, la capacidad instalada total acumulada de la energía solar FV ha aumentado exponencialmente en la última década. El despliegue de esta tecnología se ha evidenciado en todas las zonas climáticas, incluso, en países donde el mercado FV es relativamente nuevo y la experiencia de campo es escasa [9]. Además, la pandemia provocada por el COVID-19 no afectó en el desarrollo del mercado FV en 2020, ya que, durante ese año se instalaron 29 GWp más que en el año 2019, logrando así que la capacidad global acumulada alcanzara los 760 GWp [27]. A su vez, se espera que la energía solar FV alcance la llamada era de los Teravatio entre 2022-2023 [28].

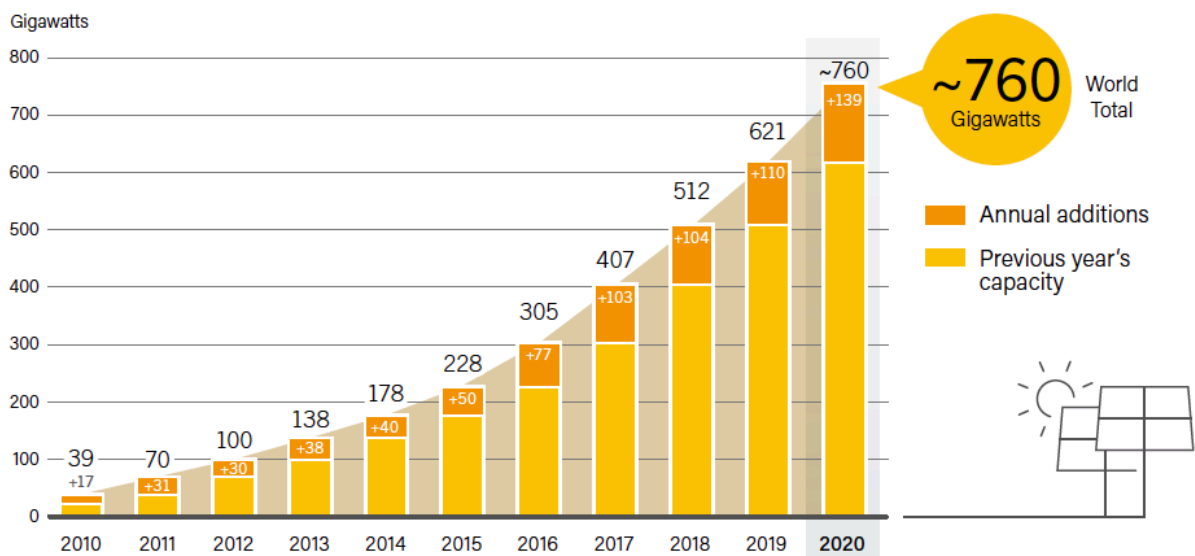


Figura 6. Capacidad global acumulada de energía solar FV y adiciones anuales entre 2010 y 2020.

Fuente: [9]

La Figura 7 muestra el ritmo de instalación anual global de la tecnología solar FV conectada a la red en la última década, diferenciada por segmentos, esto es, centralizada (*utility scale*) y descentralizada (cubierta o prosumidores FV, que identificamos como SSFVD). Tal como se puede apreciar en dicha figura, la capacidad instalada de los SSFVD superaba ligeramente a los sistemas centralizados al principio de la pasada década. Luego, la FV centralizada ha aumentado sostenidamente su capacidad instalada en comparación a los SSFVD. En 2020, el mercado FV centralizado aumentó ligeramente en números absolutos en comparación con 2019, sin embargo, disminuyó en términos relativos en el mercado. Los SSFVD instalados en el 2020 corresponden al 42 % de los 139 GWp agregados globalmente al mercado FV de ese año; esto significa un aumento del 30% de la capacidad instalada en el mercado de los SSFVD con respecto al año 2019. Además, se prevé que la capacidad solar FV distribuida a nivel mundial aumente en más del 250% entre 2019 y 2024 [121].

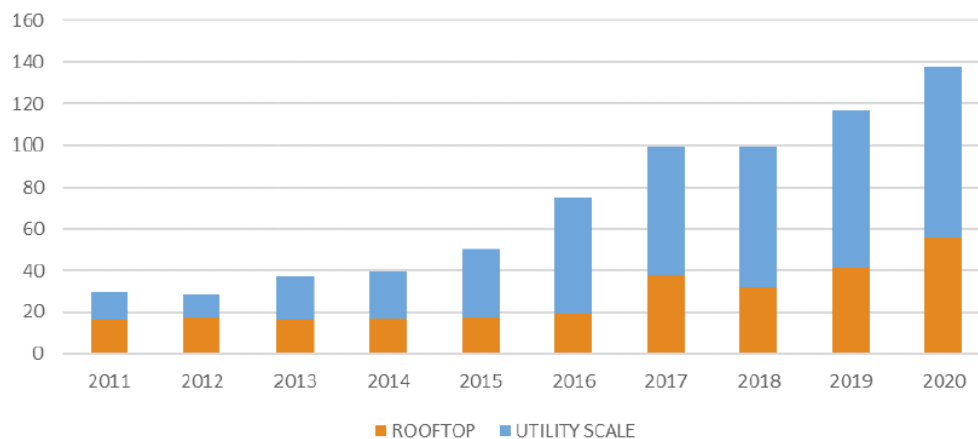


Figura 7. Segmentación de la instalación solar FV por año entre 2011 y 2020, en GWp. Fuente: [27]

Según el informe del programa de sistemas solares FV de la IEA [27], el mercado FV también ha comenzado a diversificarse en términos de los tipos de aplicaciones; tales como los sistemas FV flotantes que se suma a los centralizados, los BIPV y los BAPV en el entorno construido que se asocian al segmento de los SSFVD, y otras aplicaciones emergentes como la FV agrícola. Dicho reporte también indica que, desde el punto de vista tecnológico, el desarrollo de algunas de estas aplicaciones ha sido notable, como es el caso de la FV bifacial. Este informe también destaca que la energía solar FV integrada en vehículos demuestra una creciente diversificación de las aplicaciones de la tecnología FV, pero el nivel de penetración actual de esta aplicación en el mercado sigue siendo bajo.

En cualquier caso, la energía solar FV está lista para impulsar el futuro sostenible que se necesita. Según Victoria et al. [30], se espera que la energía solar FV continúe el aprendizaje y las reducciones de costos. Además, Victoria et al. [30] señalan que las estrategias de integración existentes permitirán una gran tasa de penetración de la energía solar FV en todo el sistema energético. Estos autores, junto a Xiao et al. [122] y a Jaxa-Rozen y Trutvenyte [123], han identificado que la mayoría de las suposiciones de costes de los modelos energéticos (por ejemplo, los utilizados para los informes del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático, IPCC, por sus siglas en inglés) ya han quedado obsoletos debido a la evolución tecnológica actual. Todos estos autores declaran que la mayoría de los escenarios energéticos futuros aplican datos desactualizados u obsoletos sobre el costo de las tecnologías de energía renovable en general, y de la energía solar FV en particular.

En consecuencia, tales suposiciones minimizan el gran potencial de la energía solar FV para mitigar el cambio climático. Además, Victoria et al. [30] destacan que la electrificación indirecta a través del acoplamiento de los sectores es una componente que falta en los informes del IPCC. Por lo tanto, existen escenarios energéticos globales de largo plazo que difieren con los escenarios utilizados por el IPCC, respecto de la participación de la energía solar FV al 2050. Los escenarios energéticos globales basados en obtener un sistema energético 100 % renovable al 2050 coinciden en que habrá una participación significativa de la energía solar FV [124]. Tal como se puede ver en Figura 8, la participación FV al 2050 variaría entre un 30–70 % según la fuente.

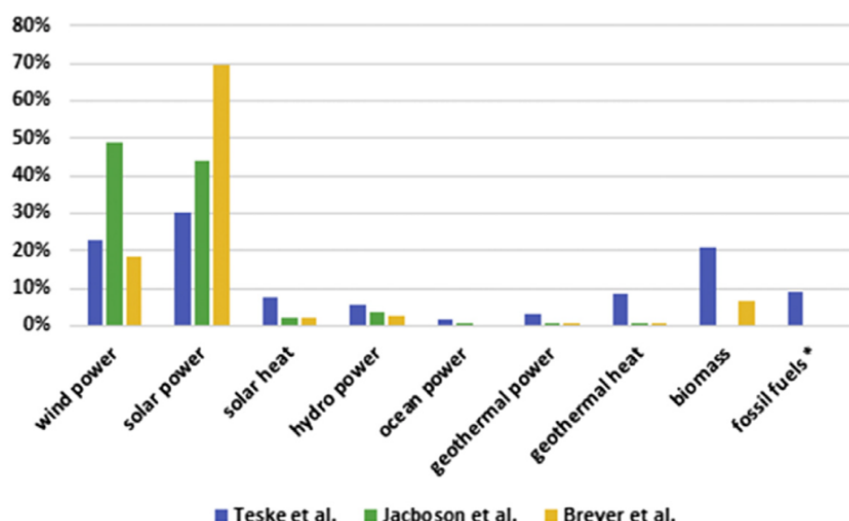


Figura 8. Participación de suministro primario de electricidad, térmica, biomasa y combustibles para un sistema energético global en el año 2050. Fuente: [124]

Según Keiner et al. [15], los prosumidores FV (o SSFVD) podrían ser vitales para habilitar y acelerar una transición energética, principalmente en las ciudades. Para 2050, este segmento aportaría alrededor del 21 % de la electricidad global generada para el sector eléctrico [24]. De hecho, la energía solar FV se ha convertido en la tecnología más asequible, ampliamente aceptada y fomentada para aumentar los niveles de electricidad renovable por su naturaleza distribuida y modular [125]. Los prosumidores FV permiten que los ciudadanos contribuyan a acelerar la desfosilización a través de una transición energética más descentralizada y participativa, obteniendo beneficios socioeconómicos, socio-ambientales y de salud pública. Sin embargo, esto puede variar de un país a otro, no solo en función de los recursos solares, sino que depende enormemente del marco regulatorio y del soporte político que exista.

2.5 Chile y la región de Aysén como caso de estudio para una transición energética sostenible

Chile cuenta con características geográficas y climáticas únicas a lo largo de sus 4.337 km de longitud, siendo un país enmarcado entre las latitudes $-17,51^{\circ}$ a $-56,02^{\circ}$. Además de su diversidad geográfica y climática, es un país interesante como caso de estudio para una transición energética sostenible por diversas razones; especialmente porque tiene características peculiares [126] que son una especie de reflejo de la crisis global energética del Antropoceno, tales como la dependencia de combustibles fósiles y el subsidio de estos, la contaminación del aire en las ciudades, los conflictos socio-ambientales por mega-proyectos energéticos, entre otras [127–132]. Sin embargo, este país cuenta con grandes oportunidades para implementar soluciones sostenibles que podrían tener repercusiones globales. Algunas de las diversas razones y peculiares características se describen a continuación.

De manera similar a la situación global, Chile depende en gran medida de los combustibles fósiles. En 2019, la participación de esos recursos energéticos supuso un 74 % del consumo total de energía final [133]. Esto implica que el sector energético sea responsable del 78 % del total de las emisiones de GEI en el país [134] (ver Figura 9). Además, según Climate Action Tracker [135], basándose en las políticas vigentes, Chile ha sido clasificado como un país insuficiente en términos de su contribución para evitar el aumento de la temperatura media global de $1,5^{\circ}\text{C}$.

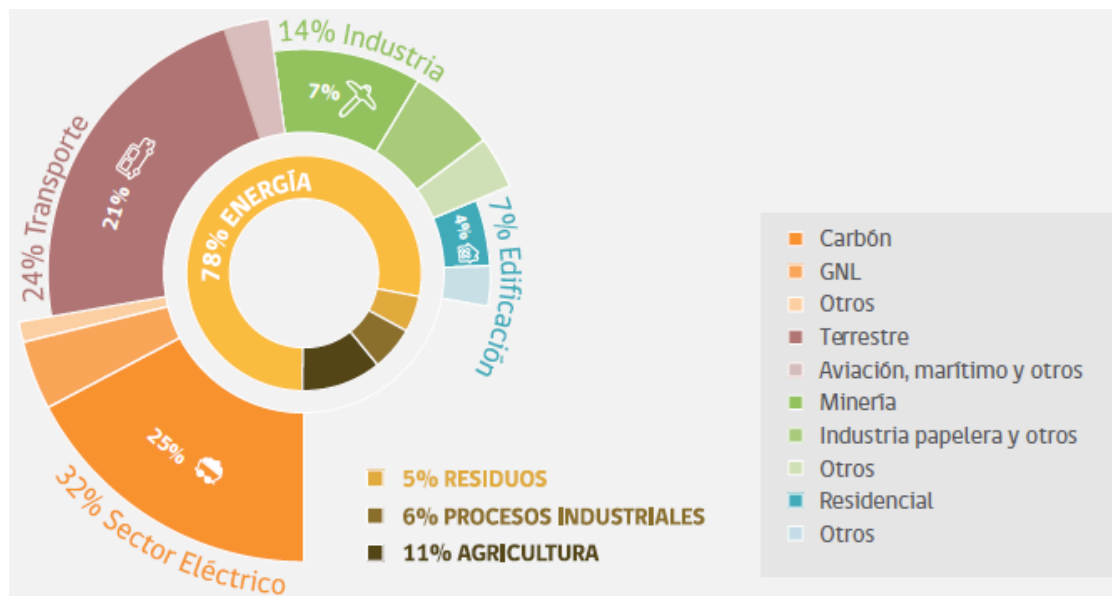


Figura 9. Emisiones de gases de efecto invernadero en Chile por sector, en 2016. Fuente: [134]

A pesar de que Chile fue uno de los primeros países en proponer NDC actualizados y más ambiciosos, siendo además uno de los pioneros en anunciar su compromiso de alcanzar la neutralidad en las emisiones de carbono para 2050, las medidas sugeridas son insuficientes en términos de su contribución a las metas acordadas en la COP21 [136]. Una de las principales medidas de mitigación para lograr ser un país neutral en emisiones de carbono se basa en la plantación forestal, la cual podría causar más impactos negativos que positivos en el medio ambiente [137,138]. En cualquier caso, las medidas para lograr la neutralidad en las emisiones de carbono son mayoritariamente para el sector energético [139].

Una de las principales medidas relacionadas con el sector energético es eliminar gradualmente todas las centrales eléctricas que funcionan con carbón en 2040. Sin embargo, está proyectado que la capacidad de generación a carbón de Chile aumentará durante el período 2019-2024, en lugar de disminuir [140]. Además, la medida de descarbonización incluirá un nuevo estado operativo que se aplicará a las centrales de generación eléctrica a carbón que busquen su cierre y desconexión; denominado “Estado operativo de reserva estratégica”. El nuevo estado operativo pagará a las centrales a carbón el 60% del pago de energía actual que se paga a una central por permanecer operativa para inyectar energía al sistema eléctrico cuando se requiera. Esto significa que la ciudadanía en Chile seguirá pagándole a las centrales eléctricas a carbón durante 5 años más a partir de la fecha de cierre y desconexión, siendo que, en la práctica, no estarán operativas [140]. Peor aún, no existe señal alguna de parte del gobierno para eliminar el subsidio actual a la minería del carbón.

Chile fue el primer país de América del Sur y uno de los primeros entre los países en desarrollo en implementar un impuesto a las emisiones de CO₂; denominado “impuesto verde” [141]. Sin embargo, las distorsiones con las que se aplica reducen y prácticamente anulan su eficacia [142]. Según la Asociación Chilena de Energías Renovables y Almacenamiento [142], el impuesto al CO₂ debe incorporarse al costo variable de las centrales emisoras para que el sistema eléctrico privilegie el uso de aquellas centrales más limpias y, así, evitar también que el impuesto se pague por el sistema de compensación. Este sistema obliga a pagar a los generadores renovables a pesar de que no emiten CO₂ en la producción de electricidad [142].

Por otra parte, esta nación cumple con siete de las nueve dimensiones de vulnerabilidad al cambio climático [143]. De hecho, ha experimentado escasez de agua y déficit de precipitaciones durante la última década, lo cual se ha denominado como la mega-sequía [144–148].

Chile fue el primer país sudamericano en unirse a la OCDE gracias a su sostenido crecimiento económico. Sus principales actividades económicas (minería, agricultura y silvicultura) son intensivas en consumo de energía y/o agua. Por ejemplo, por un lado, Chile es el mayor proveedor de cobre del mundo [149]; en la extracción de cobre, ubicada principalmente en la zona más seca del planeta (el desierto de Atacama), se ha utilizado como alternativa para cubrir el requerimiento hídrico la desalación de agua de mar [150]. Además, este país tiene las mayores reservas de cobre y litio del mundo [150]. Ambas materias primas serán necesarias para la transición energética global y sostenible [151–153], lo que ubica al país en una excelente posición para contribuir en ello [154]. Sin embargo, las principales actividades agrícolas y forestales se ubican en áreas afectadas por la mega-sequía.

En términos energético-ambientales que afecta a nivel local, Chile alberga dos de las diez ciudades con el aire más limpio de América Latina y el Caribe [35]. Sin embargo, este país también alberga 34 de las 46 ciudades sudamericanas más contaminadas [155]. Las ciudades con mayor población ubicadas en el centro y sur de Chile presentan altas concentraciones de partículas en el aire [156–160]. De hecho, en algunas ciudades, hay momentos del año en que la contaminación del aire puede ser más alta que el nivel experimentado en Beijing [161]. En la mayoría de esas ciudades, la principal fuente de contaminación es el uso excesivo de leña –húmeda– para calefacción [162]. Además, en la capital del país se han superado los estándares de ozono en las últimas dos décadas, lo que está relacionado con un aumento constante de los automóviles privados tanto a gasolina como a diésel [163].

Sin embargo, a pesar del panorama nada favorable descrito, en los últimos años, Chile ha sido reconocido como líder mundial entre los mercados emergentes por habilitar y utilizar energías sostenibles [164]. De hecho, el despliegue de las tecnologías de energía renovable en este país ha avanzado más rápido de lo planeado. La electricidad renovable inyectada a la red ha superado en 3,7 veces el objetivo obligatorio fijado por el gobierno [165]. Este éxito de la electricidad renovable se ha producido sin incentivos monetarios fiscales, subvenciones, ni tarifa de alimentación (*feed-in tariff*) [166]. A fines de 2020, las tecnologías de energía renovable no convencionales alcanzaron el 25,9 % de la capacidad instalada de generación eléctrica total en el país [165]. Si se incluyen centrales hidroeléctricas convencionales (>20 MW), este porcentaje de capacidad instalada de generación eléctrica renovable aumenta a 51,4 % [167]. Sin embargo, las emisiones de GEI en el país siguen aumentando [168] y se proyecta que el pico de emisiones se dará en el año 2027 [139].

La transición energética en curso en Chile, reconocida internacionalmente como un caso de política pública exitosa en la promoción de las energías renovables [164], ha sido criticada en el contexto científico debido a que la incorporación de fuentes renovables en la matriz energética no ha modificado el modelo tecnocrático de gestión de mercado ni la estructura de propiedad de los proyectos, y tampoco ha supuesto un avance hacia sistemas energéticos democráticos y descentralizados que promuevan el desarrollo local y la participación efectiva de las comunidades en la toma de decisiones en materia energética [169,170].

No obstante, Chile tiene excelentes condiciones para transformar rápidamente su sistema energético existente hacia uno independiente de los combustibles fósiles. La Figura 10 ilustra el potencial de energías renovables de este país (sin contar el existente en la Patagonia chilena), el cuál se ha estimado que es 70 veces superior a la capacidad instalada de generación eléctrica actual [171], donde, 68 % corresponde a solar FV. De hecho, Chile cuenta con los sitios con recursos de energía solar y eólica más altos del mundo; estos sitios están ubicados en el desierto de Atacama [172] y el lado chileno de la Patagonia [173], respectivamente.

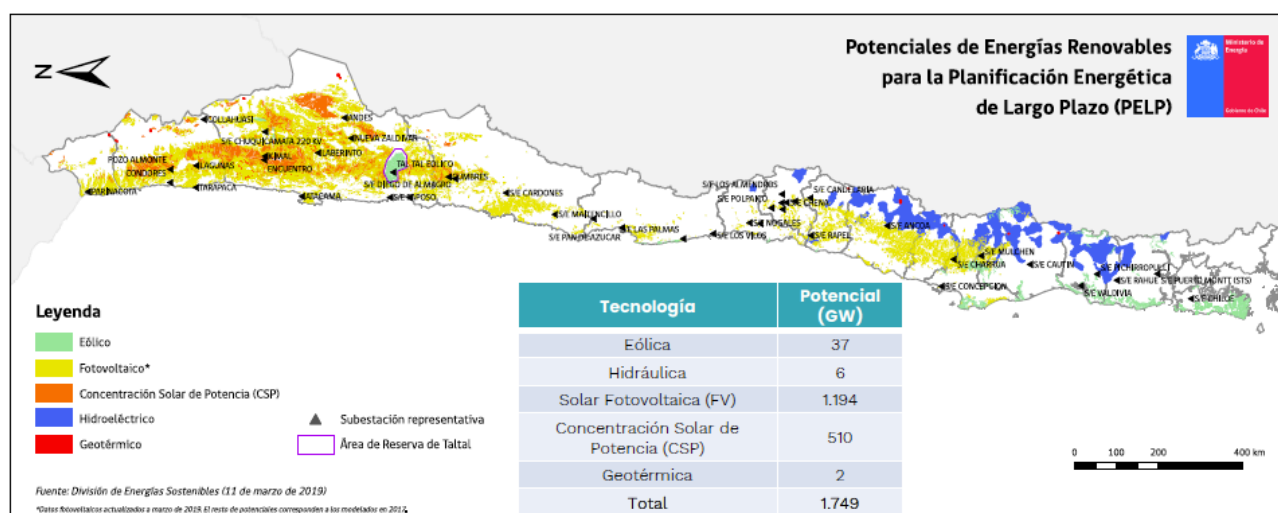


Figura 10. Potencial de energías renovables en las regiones del sistema eléctrico nacional. Fuente: [171]

Además de que el desierto de Atacama tiene los niveles de irradiación solar más altos del mundo, el recurso solar distribuido por todo el territorio continental de este país es considerablemente alto para ser aprovechado como energía térmica y eléctrica [174], así como para utilizarlo con el propósito de descontaminación del aire en las ciudades. Una manera de aprovechar el recurso solar es a través de la tecnología FV, tal y como muestra la instalación de grandes parques FV en el norte del país. Sin embargo, Chile tiene barreras regulatorias en el segmento de prosumidores [175] y carece de suficientes instrumentos políticos para la promoción de este segmento [166].

En línea con el liderazgo de Chile en la implementación de tecnologías que utilizan recursos renovables, este es el primer país de la región con una central eléctrica basada en energía geotérmica y con una central eléctrica termo-solar de concentración que proporcionará electricidad las 24 horas del día. En cualquier caso, Chile ha utilizado menos del 1% del potencial tecno-económico de energía renovable que se distribuye naturalmente a lo largo de su territorio continental.

Finalmente, cabe destacar que Chile ha sido identificado como uno de los países que tiene los costos más bajos para la producción de combustibles y químicos basados en energías renovables [176–180]. De hecho, Chile podría producir hidrógeno verde por solo la mitad del costo al que lo produciría Alemania [181].

A tenor de las cifras y los objetivos planteados, la transición energética que está en curso en Chile debe acelerarse. No obstante, la comprensión de la transición energéticas por parte de la comunidad científica del país apenas está comenzando. Por ejemplo, los artículos científicos aplicados desde un enfoque local a Chile que han considerado al menos el 60% de la electricidad

generada a partir de fuentes de energía renovable [182–184], no incluían los sectores térmico y transporte en el análisis. Es decir, esos trabajos se han focalizado exclusivamente en el modelado de escenarios para el sector eléctrico, el cual representa menos de un cuarto de la demanda de energía final del país. El sector térmico se abordó recientemente, pero solo centrándose en la función de las tecnologías de calefacción distrital para la descarbonización y descontaminación del aire [185].

A su vez, los tres artículos científicos aplicados desde un enfoque local que han contemplado lograr un sistema 100% renovable para Chile [186–188], también se abordaron solo para el sector eléctrico. Además, por una parte, estos estudios no contemplaron a los prosumidores FV en el análisis y, por otra, no han incluido todo el territorio chileno, ya que no han incluido a las regiones localizadas en la Patagonia, así como tampoco se incluyó en el análisis el potencial de energías renovables de este territorio.

En resumen, tanto los prosumidores FV como las regiones ubicadas en la Patagonia chilena no han sido contemplados en los trabajos científicos de modelado de transición energética que se ha llevado a cabo desde un enfoque local para Chile. Tomando esto en consideración, y atendiendo a que no se ha encontrado en la literatura análisis comparativos del modelado de una transición energética desde un enfoque global y local para un mismo país, es que se han incluido tanto los prosumidores FV como las regiones localizadas en Patagonia chilena en el estudio llevado a cabo en el marco de esta tesis doctoral. En particular, el análisis desde un enfoque sub-nacional de este trabajo se ha focalizado en la región de Aysén. Este estudio particularizado en la región de Aysén nos permitirá discernir sobre las diferencias de resultados obtenidos en un modelado energético atendiendo a factores de escala cuando se traslada desde una visión global a un enfoque local.

La región de Aysén, ubicada dentro del territorio de la Patagonia Chilena y enmarcada entre las latitudes $-43,63^{\circ}$ y $-49,27^{\circ}$, tiene características que la diferencian con el resto del País. Pero a su vez, y al igual que Chile, esta región también cuenta con peculiaridades que la convierten en un caso interesante para el estudio de una transición energética sostenible. Algunas de las diferencias con el resto de Chile y sus peculiaridades se describen a continuación.

La región de Aysén es la menos poblada del país [189], siendo que, territorialmente, es la tercera más grande de Chile, ocupando un 14 % del territorio nacional, del cual, el 50 % es catalogado como área silvestre protegida [190] (ver Figura 11). Esta región alberga el 35 % del bosque nativo del país, y contiene el 35 % del total nacional de los recursos hídricos; lo que la convierte en una de las reservas de agua dulce y pura más importantes, no solo de Chile [190].

Históricamente, la región de Aysén ha estado aislada del resto del país, tanto en términos de conectividad por vía terrestre como en términos de interconexión eléctrica. Además, tiene condiciones de aislamiento dentro de la misma región que aún existen. A su vez, en esta región predomina –sobre todo en zonas rurales– una cultura poco familiarizada con los avances tecnológicos [191]. Sin embargo, en comparación al resto de Chile, tiene una población que ha participado activamente en la discusión energético-ambiental del país [192]. De hecho, Aysén es una de las dos regiones del país que cuentan con política energética propia, tanto impulsada por el gobierno [193] como por la ciudadanía [194].

Por otra parte, y de manera similar a lo que ocurre en Chile, en la región de Aysén el porcentaje de los combustibles fósiles en el consumo total de energía final es de un 70 % [195]. Debido a que la región no cuenta con recursos fósiles de ningún tipo, estos son en su totalidad importados [193].

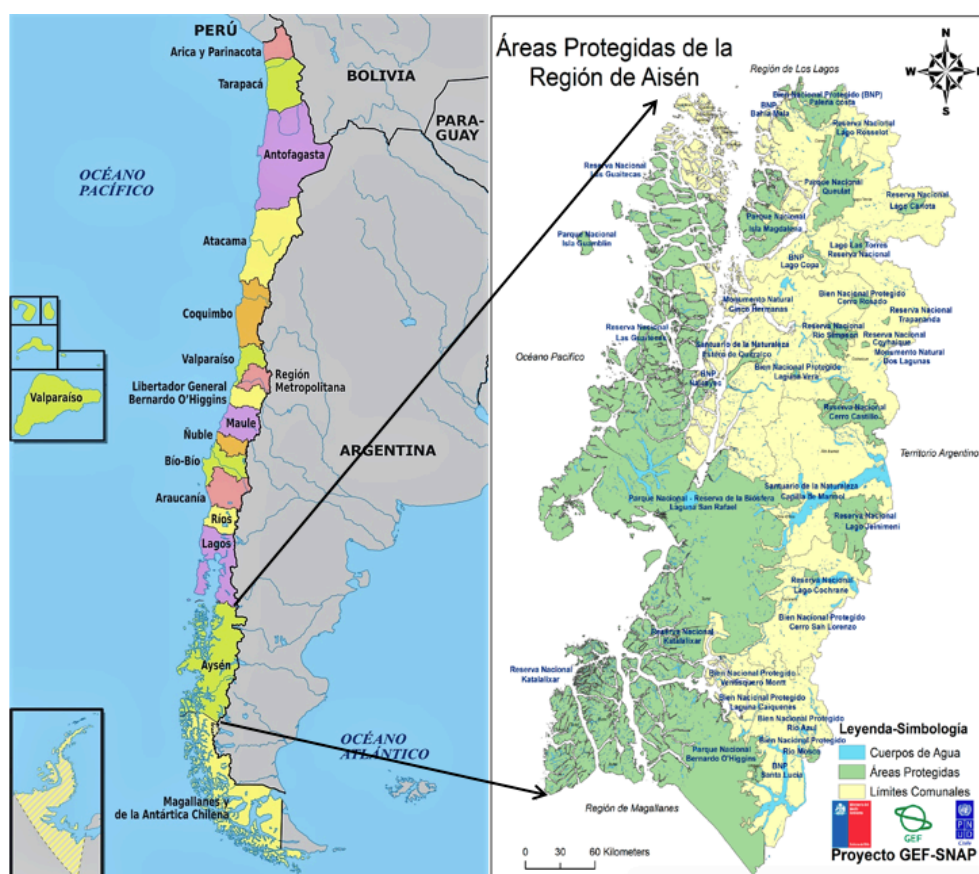


Figura 11. Mapa de Chile y sus regiones (izquierda) y la región de Aysén destacando sus áreas protegidas en verde (derecha).

Además, en la región de Aysén se encuentra la ciudad con mayor número de episodios de contaminación del aire por partículas en suspensión y con los niveles de concentración más elevados de Chile [196]. Este es el caso de Coyhaique, capital de esta región, la cual, ha experimentado niveles de contaminación que han sido superiores a los registrados en Beijing [161]. Esto se debe a un consumo elevado de leña húmeda con fines de calefacción y cocción de alimentos en el segmento residencial, representando más del 95 % de estas emisiones [196].

Otro aspecto que diferencia a la región de Aysén con el resto del país es que está desconectada del sistema eléctrico nacional. En esta región existen tres sistemas eléctricos medianos –de entre 3,5 MW y 60 MW que están compuestos por unidades de generación y redes distribución, y donde la capacidad instalada de generación de electricidad a partir de diésel está entre 57–82 %–, nueve sistemas eléctricos aislados –de entre 0,1 MW y 1 MW, también compuestos por unidades de generación y redes de distribución, donde, en seis de ellos la capacidad instalada de generación eléctrica a partir de diésel es de un 100 %, y en los otros tres está entre 32–65 %– y, más de medio millar de sistemas autónomos de pequeña escala –menores de 100 kW, de los que más del 95 % son sistemas solares FV– [191]. Debido al bajo nivel de industrialización de esta zona del país, el consumo de electricidad es alrededor del 5 % del consumo total de energía final [193].

La capacidad instalada de energías renovables en la región de Aysén es de un 40 % del total regional (3 MW eólico y 21 MW hidráulica de pasada) [197]. El primer parque eólico de tamaño industrial para generación de electricidad de Chile fue instalado en esta región [191]. Y, la primera central solar FV (3 MWp) de este territorio entrará en operación en el segundo semestre de 2021, la cual se convertirá en la central solar FV más austral de América [198].

Según los estudios revisados, el potencial de energías renovables de esta región, al igual que en Chile, también es abundante. Solo entre los 5.061 MW de eólica, 5.967 MW de hidráulica y 765 MW de biomasa como potenciales estimados para generación eléctrica [193], se supera en más de 190 veces la capacidad total instalada actualmente en la región. Esto es sin contar el potencial de la energía solar FV presente en la zona. Tal como se puede ver en la Figura 12, en Aysén existen áreas donde la irradiación global horizontal (GHI, por sus siglas en inglés) alcanza los 4,5 kWh/m²-día; lo cual es comparable a los niveles de radiación de la zona centro sur del país (latitud -38 °).

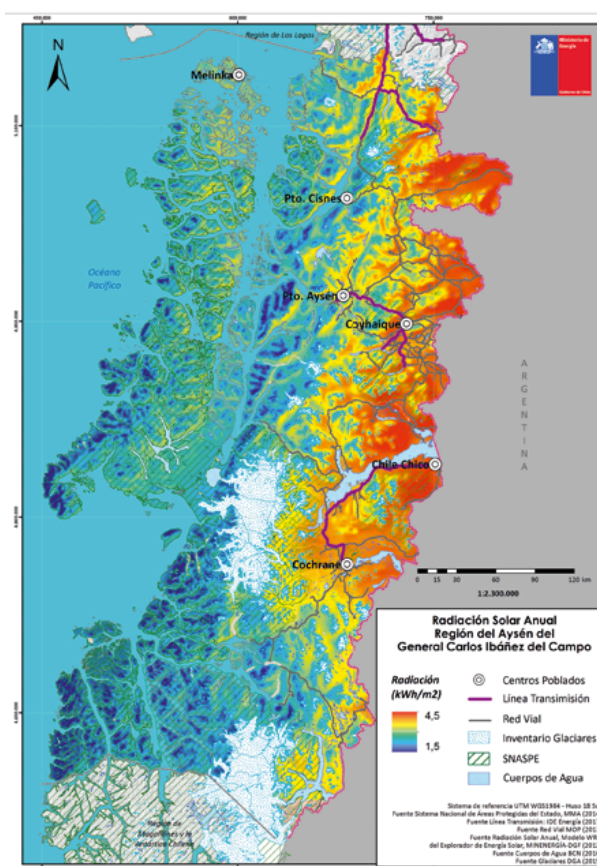


Figura 12. Mapa del potencial de energía solar en la región de Aysén. Fuente: [193]

A pesar de la existencia de enormes potenciales energéticos locales y renovables en la región de Aysén, tanto en los sistemas eléctricos –medianos y aislados– que tienen administración privada como en los que son de administración comunitaria, se han fomentado los combustibles fósiles, haciéndose indispensable el subsidio estatal para mantenerlos [191].

Por último, a la región de Aysén se le ha dejado fuera de los estudios nacionales y nunca se le ha realizado un análisis de transición energética al 2050 que contemple un escenario para obtener un sistema 100 % renovable. Adicionalmente, tampoco se ha analizado el rol que los SSFVD pueden jugar en un escenario de transición energética para esta región.

2.6 Situación actual de la energía solar FV en Chile y su proyección a largo plazo

Aunque Chile tiene una historia asociada a la energía solar que se extiende por más de 140 años, la presencia de energía solar FV es muy reciente en el mix energético. La Figura 13 muestra la capacidad instalada total acumulada de tecnología solar FV en este país. Tal como se puede observar, ésta tuvo un incremento sostenido en la pasada década, alcanzando los 3,23 GWp a finales de 2020; lo cual representa un 13 % del total nacional de capacidad instalada para generación eléctrica [165].

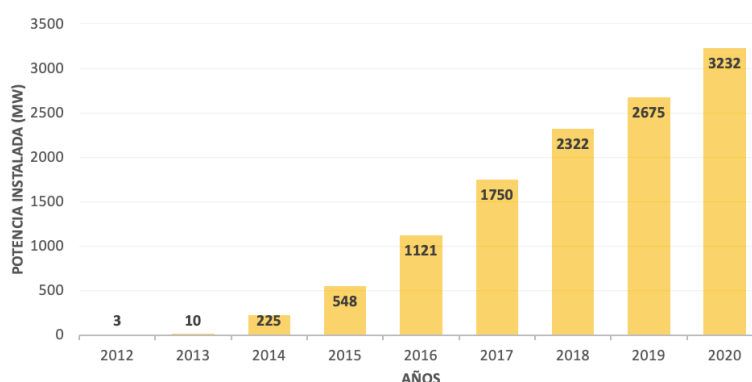


Figura 13. Capacidad instalada acumulada de los sistemas FV centralizados en Chile. Fuente: [199]

Chile ha sido clasificado como el quinto país del mundo con mayor nivel de penetración FV en el sector eléctrico (ver Figura 14). Durante 2019, las centrales solares FV contribuyeron en evitar la emisión de 2,6 MtCO_{2eq} en este país [195]. Además, la capacidad instalada de la energía solar FV en Chile seguirá su aumento en los próximos años. Entre los 229 MWp en prueba, 3.674 MWp en construcción, 22.197 MWp aprobados y 6.304 MWp en evaluación, hay proyectado un total de 32,4 GWp para ser instalados en el corto y mediano plazo [165].

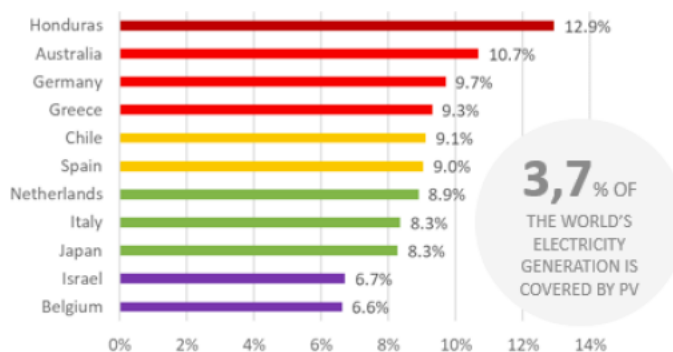


Figura 14. Países con más altos niveles de energía solar FV en el sector de generación de electricidad. Fuente: [27]

Por otra parte, en cuanto a los SSFVD conectados a la red (o prosumidores FV), desde que entró en vigencia la Ley 20571 [200] en 2014, conocida como “Ley de Generación Distribuida”, la potencia instalada de estos sistemas ha incrementado exponencialmente (ver Figura 15). Hasta fines de 2020, se habían instalado un total de 7.120 SSFVD, los cuales suman una capacidad total de 73,4 MWp. Sin embargo, éstos representan el 2,2 % de la capacidad total actualmente instalada de solar FV en Chile. Según el Informe de Planificación Energética a Largo Plazo del gobierno de Chile [201], el 20 % del parque de viviendas del país es técnicamente apto para implementar un sistema FV de 2 kWp, lo que se podría traducir en cerca de 1,13 millones de SSFVD residenciales; sin embargo, actualmente hay instalado menos del 1% de ese número apto de viviendas.

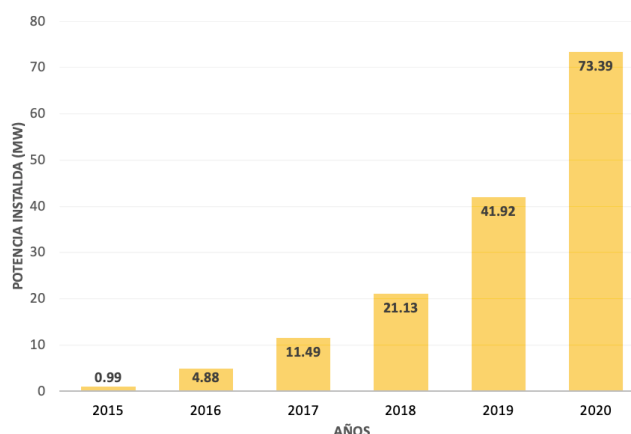


Figura 15. Capacidad instalada total acumulada de la FV descentralizada conectada a la red en Chile.

Fuente: [202]

Por otra parte, además de los planes energéticos que ha realizado el gobierno, existen trabajos que han analizado escenarios futuros para Chile. En la Tabla 4 se muestran tanto los artículos científicos como los estudios que han proyectado escenarios energéticos para este país al 2050, desde enfoques globales y nacionales, con énfasis en mostrar la participación de la FV que arrojan los resultados. En dicha tabla, se presentan las referencias ordenados cronológicamente (de 2017 a 2020) y se indica el enfoque desde el cual fue abordada la proyección de escenarios energéticos. Además, en la Tabla 4 también se indica si se incluyó a todo el país en el análisis, tanto desde el punto de vista del territorio como de la demanda total de energía y potencial de recursos renovables. A su vez, se muestran los sectores energéticos involucrados en el análisis de cada trabajo, así como también, se expone el porcentaje de generación eléctrica renovable y el porcentaje de participación de FV centralizada y descentralizada en la generación de electricidad.

Tabla 4. Artículos científicos y estudios que contienen proyección de escenarios energéticos para Chile y la contribución de las energías renovables y energía solar FV al 2050.

Fuente: [Elaboración propia]

Referencia	Enfoque	Todo Chile	Sector	Porción renovable	Porción FV	Porción SSFVD
Muñoz et al. [182]	Nacional	No ⁱ	Eléctrico	70 %	23 %	n.i. ⁱⁱⁱ
Breyer et al. [24]	Global	Si	Eléctrico	100 %	54 %	24 %
Jacobson et al. [203]	Global	Si	Todos	100 %	39 %	34 %
Raugei et al. [183]	Nacional	No ⁱ	Eléctrico	60 %	40 %	n.i. ⁱⁱⁱ
Haas et al. [186]	Nacional	No ⁱ	Eléctrico	100 %	46–70 % ⁱⁱ	n.i. ⁱⁱⁱ
Maximov et al. [184]	Nacional	No ⁱ	Eléctrico	70–87 %	18–32 % ⁱⁱ	n.i. ⁱⁱⁱ
Haas et al. [187]	Nacional	No ⁱ	Eléctrico	100 %	57–63 % ⁱⁱ	n.i. ⁱⁱⁱ
Teske et al. [40]	Global	Si	Todos	100 %	28 %	21 %
Ram et al. [32]	Global	Si	Todos	100 %	39 %	12 %
Gaete-Morales et al. [188]	Nacional	No ⁱ	Eléctrico	81–100 %	20–33 % ⁱⁱ	n.i. ⁱⁱⁱ
Gobierno de Chile [171]	Nacional	No ⁱ	Eléctrico	93–96%	25–29 % ⁱⁱ	n.i. ⁱⁱⁱ

ⁱ No incluye las regiones de Aysén y Magallanes localizadas en la Patagonia Chilena.

ⁱⁱ Varios escenarios.

ⁱⁱⁱ No informado.

De la Tabla 4 se puede deducir lo siguiente: solo los trabajos aplicados desde un enfoque global han incluido a todo el país en el análisis (desde el punto de vista de considerar el potencial de energías renovables del territorio chileno) y han considerado todos los sectores bajo un sistema energético 100 % renovable. En el caso de los trabajos aplicados desde un enfoque nacional, solo han considerado el sector eléctrico en el análisis. Particularizando la contribución de la tecnología FV en su conjunto en la generación de electricidad, entre todos los trabajos, e independiente del enfoque, varían las previsiones entre 20–70 % y, la contribución de los SSFVD varía entre un 12–34 %. Sin embargo, los SSFVD solo han sido informados en los trabajos aplicados desde un enfoque global.

Por lo tanto, considerando que, por una parte, no se ha encontrado en la literatura análisis comparativos del modelado de una transición energética desde un enfoque global y local para ningún país, y por otra, atendiendo a que los porcentajes de la contribución de la tecnología solar FV varían según la escala del análisis, así como también, apelando a que la figura del prosumidor FV puede jugar un rol significativo en la transición energética de un país, se torna necesario adaptar y aplicar una herramienta de modelado que ha sido utilizada desde un enfoque global, a uno local. En el marco de esta tesis doctoral, la adaptación de la herramienta de modelado se aplica al caso de Chile y la región de Aysén.

De esta manera, el análisis del modelado de transición energética desde diferentes enfoques para un mismo país, con énfasis en la tecnología solar FV, permitirá obtener resultados más fiables y adaptados a la realidad de un país a partir de las distintas realidades de cada territorio. Esto, debido a que, en el modelado desde un enfoque global, un país se considera como un solo nodo consumidor de energía ubicado en un punto geográfico de su territorio a partir del cual se obtienen resultados a nivel nacional. No obstante, en el modelado de transición energética desde un enfoque local, un país se subdivide en varios nodos de consumo de energía repartidos a lo largo y ancho de su territorio, pudiendo así obtener resultados a nivel sub-nacional y, al sumarlos, conseguir resultados a nivel nacional. Para ello, se usará una herramienta de modelado global que será adaptada a un modelado desde un enfoque local. Esto puede servir como base para comprender cuál sería el enfoque más apropiado para llevar a cabo el modelado energético, así como también, para sugerir estrategias que promuevan la democratización y participación ciudadana en la producción de energía, a la vez que se fomenta una transición energética bajo un modelo más descentralizado. Todo esto, también puede conllevar a una base de información para estimar indicadores asociados a los beneficios socio-ambientales y socio-económicos que deberían surgir del análisis de una transición energética sostenible, desde un enfoque local.

3. Metodología

En esta sección se presenta una descripción general de la metodología empleada para lograr los objetivos planteados en esta tesis. El trabajo de investigación realizado en el marco de esta tesis doctoral se llevó a cabo en tres etapas. La primera consistió en identificar barreras y oportunidades en la implementación de la tecnología FV descentralizada, a través de un análisis basado en datos empíricos asociados a los sistemas solares FV existentes en Chile y la región de Aysén en particular. Esto se efectuó considerando aspectos económicos, legislativos, regulatorios y técnicos.

En la segunda etapa se realizó una revisión de la literatura, por una parte, para identificar herramientas de modelado energético y, por otra, para conocer los criterios, factores e indicadores asociados a los sistemas solares FV que están siendo utilizados en la planificación energética a escala local. Esto último, con el propósito de identificar el procedimiento de analizar aquellos beneficios que trascienden los meramente técnicos y económicos y que pueden servir como argumento adicional para acelerar la implementación de la transición energética sostenible.

Finalmente, la tercera etapa contempló la adaptación de una herramienta de modelado de transición energética que se aplica desde un enfoque global al caso local de Chile y la región de Aysén, con el propósito de analizar el rol que los SSFVD pueden jugar en la transición energética sostenible al año 2050 en estos territorios y, a su vez, corroborar la hipótesis de partida de esta tesis doctoral.

3.1 Identificación de barreras y oportunidades asociadas a la solar FV descentralizada

Para la identificación de barreras y oportunidades asociadas al despliegue de la tecnología solar FV descentralizada en Chile y en particular la región de Aysén, en primera instancia se llevó a cabo una etapa de recopilación de información. Dentro de la información recopilada se tiene: los costos de inversión de los SSFVD por rango de potencia instalada, los precios de las tarifas de electricidad, los precios de las tarifas de la inyección a la red, las leyes y regulaciones vigentes en Chile que afectan a los SSFVD, los datos de irradiación solar desde distintas fuentes y los datos de potencia instalada y energía generada de los sistemas solares FV existentes en la región.

En segunda instancia, basándose en la información recopilada, se llevó a cabo un análisis asociado a los aspectos económicos, legislativos, regulatorios y técnicos que influyen en la implementación descentralizada de la energía solar FV en Chile. Para dicho análisis, por una parte, se desarrolló un enfoque metodológico que evalúa los parámetros tecno-económicos que influyen en el mercado de los SSFVD desde la perspectiva de los formuladores de políticas. Este enfoque metodológico se basó en técnicas econométricas ampliamente usadas en el análisis de proyectos de energía renovable, tales como: el tiempo de recuperación de la inversión, la tasa interna de retorno y el costo nivelado de la energía. En este análisis, ante la ausencia de información técnica específica que es de propiedad de privados, se desarrolló un nuevo enfoque para la evaluación de la operación de sistemas solares FV existentes. Este enfoque se basó en datos empíricos disponibles e indicadores clave de rendimiento, que además se compararon con otras regiones del mundo y con mercados FV maduros de países de Europa.

3.2 Identificación de criterios, factores e indicadores asociados a la planificación energética

Debido a que la mayoría de las herramientas y técnicas de análisis de proyectos energéticos se centran en aspectos técnicos y económicos, se determinó necesario identificar criterios, factores e indicadores asociados a otros aspectos en herramientas de modelado y planificación energética, tales como socio-ambientales y socioeconómicos. Para la identificación de los criterios, factores e indicadores asociados a la planificación energética a escala local, se procedió inicialmente a realizar una revisión de la literatura con el propósito de identificar herramientas de modelado energético.

Posteriormente, se realizó una revisión sistemática de la literatura siguiendo las pautas de PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*) [204]. Esta revisión tuvo como objetivo determinar si los artículos científicos bajo el concepto de planificación energética espacial están considerando aspectos que van más allá de los tecno-económicos y, a su vez, entender cómo están abordando los criterios, factores e indicadores contemplados bajo esos aspectos. Adicionalmente se perseguía indagar en la identificación de potenciales beneficios socioeconómicos y socio-ambientales asociados a los SSFVD y que podrían ser evaluados junto con el modelado de escenarios de transición energética.

3.3 Adaptación de una herramienta de modelado energético con enfoque global a uno local

Para analizar el rol que los SSFVD pueden jugar en la transición energética sostenible y, a su vez, comprobar si el análisis desde un enfoque local revela un rol de la tecnología solar FV descentralizada más significativo que el de un análisis desde un enfoque global, se procedió a adaptar una herramienta de modelado energético que se ha utilizado para análisis desde un enfoque global, a un enfoque local. La herramienta de modelado de sistemas energéticos que se utilizó fue el modelo *LUT Energy System Transition (LUT-EST model)*.

El *LUT-EST model* se ha ido desarrollando progresivamente desde el sector eléctrico [20,205] hasta la integración de los sectores eléctrico y térmico [78], transporte [79] y desalinización [206], respectivamente. En el caso de la industria de producción de combustibles, el modelo tiene la capacidad de simular la producción de *e-fuels* (gaseosos y líquidos) [176,177] basados tanto en hidrógeno verde [178] como en la captura directa de CO₂ desde el aire [207], lo que se enmarca dentro del concepto *PtX*. Una descripción detallada de cómo funciona el *LUT-EST model* con todos los sectores integrados se puede encontrar en Bogdanov et al. [108].

La Figura 16 muestra la estructura fundamental del *LUT-EST model* con las principales entradas y salidas. La herramienta de modelado ejecuta simulaciones en dos pasos. Inicialmente se determina una porción de menor coste de los prosumidores de electricidad y del sistema de usuarios individuales de calefacción. Esto permite que la energía se produzca cerca del punto de demanda y representa un sistema energético más descentralizado. Posteriormente, el modelo define un sistema de producción de energía costo-optimizado y un modo de operación que integra todos los aspectos principales de las demandas del sector eléctrico, térmico, transporte y desalinización.

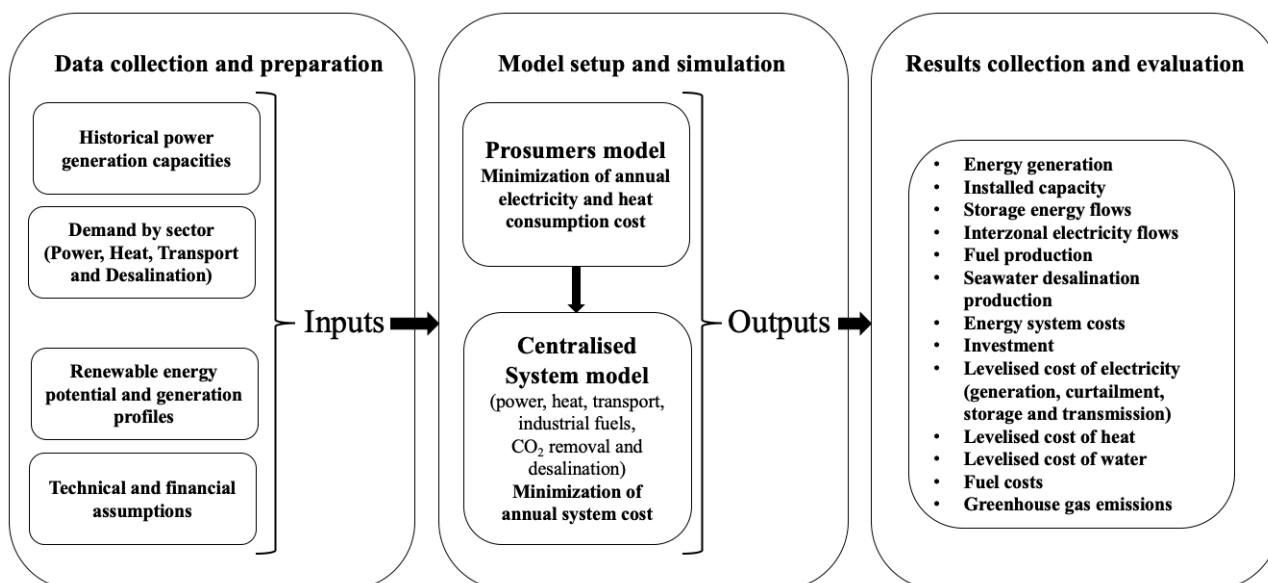


Figura 16. Estructura fundamental del *LUT-EST model* y sus principales entradas y salidas.

Fuente: [20]

La función objetivo del modelo es la minimización de los costos anuales totales de un sistema energético. Esto se lleva a cabo mediante la aplicación del método de optimización lineal bajo determinadas restricciones basadas en los parámetros del sistema energético. Estos incluyen la participación y/o la eliminación gradual de una tecnología específica y el porcentaje de generación de energía renovable durante el período de transición, entre otros.

En el *LUT-EST model* se utiliza una resolución horaria completa durante todo un año para simular una ruta de transición del sistema productor de energía entregada en intervalos de cinco años, garantizando que la demanda de energía de todos los sectores esté cubierta. La alta resolución temporal del modelo permite la identificación de elementos cruciales relacionados con las opciones de flexibilidad en un sistema energético acoplado intersectorialmente. Todo esto es clave para intentar analizar los impactos de las tecnologías relacionadas con la energía de una manera más realista.

La Figura 17 ilustra a través de una representación esquemática los elementos que son clave para modelar un sistema totalmente integrado e interconectado entre los sectores demandantes y productores de energía. Para ello, el *LUT-EST model* involucra un total de 108 tecnologías relacionadas con la generación, producción, almacenamiento, transformación, transmisión y consumo de energía.

El *LUT-EST model* cumple con la mayoría de los criterios de sostenibilidad de un sistema energético según la definición de Child et al. [12]. Dentro de los escenarios de transición energética simulados con el *LUT-EST model* para lograr un sistema 100 % basado en fuentes de energía renovable en Chile al 2050, se obtuvo un escenario modelado desde un enfoque global y, escenarios modelados desde un enfoque local que incluye todo el territorio continental de este país y consideró la región de Aysén como una de las divisiones sub-nacionales.

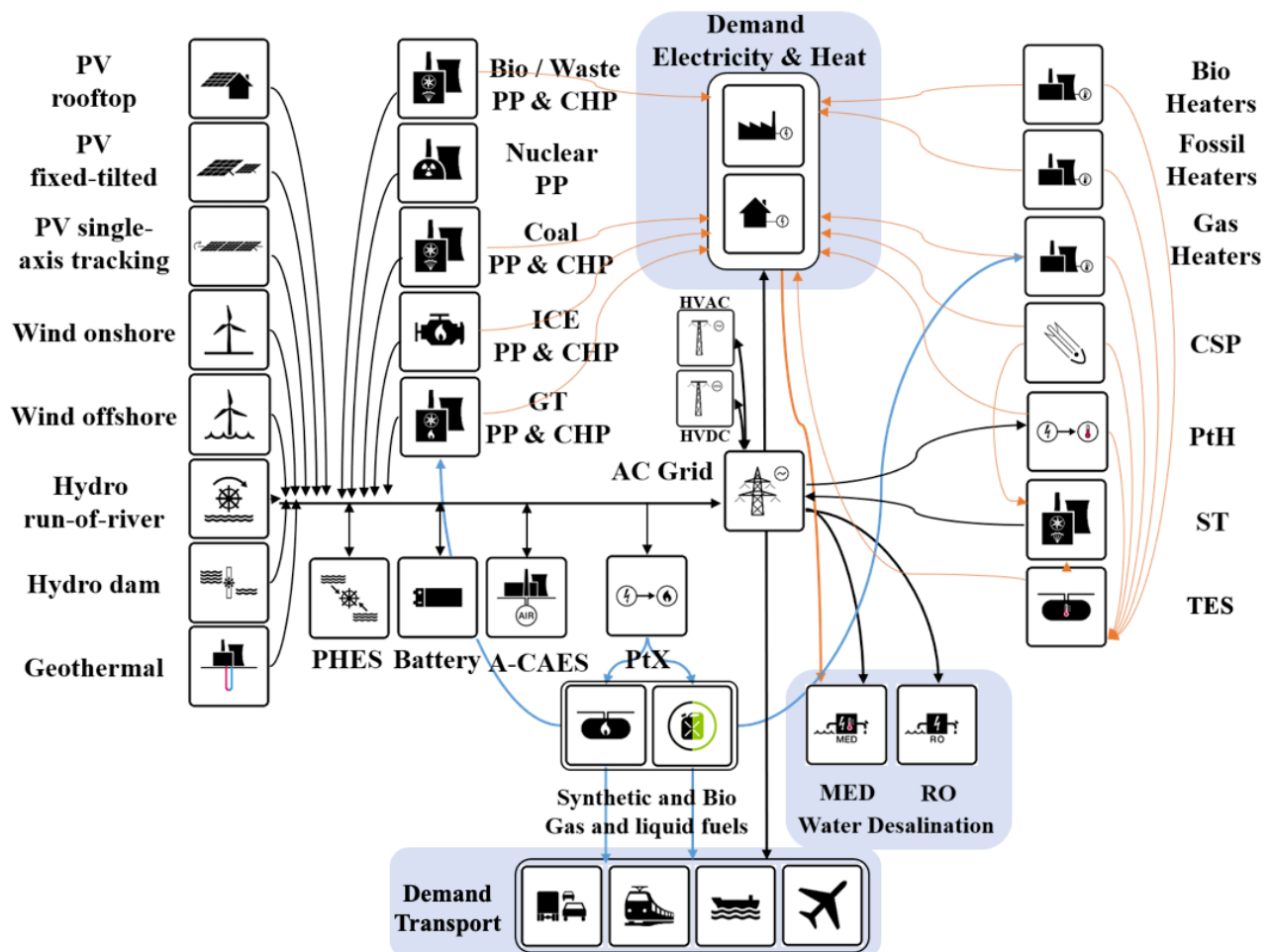


Figura 17. Representación esquemática del *LUT-EST model* para un sistema energético interconectado y con todos los sectores acoplados. Fuente: [108]

En términos generales, se realizó la preparación de datos correspondientes al territorio continental de Chile y se establecieron algunos supuestos para ser introducidos en la herramienta de modelado y, así, simular escenarios de transición energética hacia un sistema 100 % basado en energía renovable al año 2050 para este país y la región de Aysén. Esto se llevó a cabo en el marco de un trabajo colaborativo con el *Solar Economy Research Group* del *Laboratory of Electrical Engineering, School of Energy Systems* de la *Lappeenranta University of Technology (LUT)*, de Finlandia. En esta investigación conjunta se adaptó al caso de Chile la herramienta de modelado de transición energética que dicho grupo de investigación viene desarrollando desde el año 2014.

Además, basándose en la herramienta metodológica para estimar el potencial de creación de empleos directos en el sector eléctrico bajo una transición energética global al 2050 [208] (también desarrollada por el *LUT Solar Economy research group*), dicha herramienta fue ampliada para estimar el potencial de creación de empleos directos para todos los sectores energéticos. Dentro de las tecnologías involucradas en esta herramienta metodológica se encuentran las de generación de energía (eléctrica y térmica), las de producción de combustibles, las de almacenamiento de energía y, las de transmisión y distribución de electricidad. Con esta herramienta metodológica se obtuvieron los primeros resultados del potencial de creación de empleos directos para Chile durante una transición energética que involucra a todos los sectores, pero desde un enfoque global.

4. Resultados y discusión

En esta sección se resumen y discuten los principales resultados obtenidos durante la realización de la tesis doctoral, los cuales se presentan en el marco de los objetivos específicos planteados para llevar a cabo este trabajo de investigación.

4.1 Barreras y oportunidades en torno a la tecnología solar FV descentralizada en Chile y la región de Aysén

Los resultados que se exponen a continuación fueron obtenidos en el marco de la consecución del objetivo específico 1): *“Identificar barreras y oportunidades asociadas a la implementación de la tecnología solar FV descentralizada en Chile y la región de Aysén”*.

4.1.1 Barreras

En el trabajo realizado en el marco del objetivo 1, se detectó que el segmento de prosumidores FV residenciales (PFVR) es el que adolece de más barreras para su implementación. Aunque los PFVR superan en número de instalaciones a los prosumidores FV comerciales y públicos juntos en casi todas las regiones del país, es el segmento que hasta septiembre de 2019 no contaba con opciones crediticias o de financiamiento, ni con ningún tipo de incentivo monetario o programa de fomento. Junto con la carencia de instrumentos financieros e incentivos para los PFVR, se identificaron dos barreras principales que se potencian negativamente: el bajo ingreso de dinero por hogar y los altos costos de inversión de un sistema solar FV conectado a la red. Además, se reveló que el marco regulatorio actual, net-billing, es insuficiente para explotar el potencial de los SSFVD en Chile.

La condición socioeconómica de las familias a lo largo de Chile supone una barrera importante para el despliegue de los PFVR. En 2017, el promedio nacional de ingreso mensual por hogar fue 1.715 USD. El 68 % de los hogares en Chile tiene un ingreso menor que el promedio nacional. De hecho, según un estudio [201] realizado por el gobierno de este país donde se analizó la factibilidad de implementación de sistemas FV de 2 kWp en viviendas, solo alrededor del 1% de los hogares del país cumple con los requisitos socioeconómicos establecidos para la instalación de ese tipo y tamaño de sistemas. Además de que la vivienda debía cumplir algunas características técnicas para la instalación de un sistema FV de 2 kWp, se establecieron restricciones socioeconómicas tales como: que el propietario viva en la casa; que el nivel mínimo de ingreso mensual familiar sea igual o superior a 1500 USD y; que al menos haya un profesional por familia para poder obtener un crédito bancario [201]. Sin considerar las restricciones socioeconómicas, el porcentaje de viviendas aptas para instalar un sistema FV de 2 kWp aumenta al 20% del parque de viviendas de Chile, lo que se traduciría en cerca de 1,13 millones de PFVR [201]; sin embargo, actualmente existen poco más de 7.000 PFVR. Por lo tanto, el tamaño potencial del mercado de los PFVR difícilmente podrá ser explotado sin mecanismos de incentivo o instrumentos de fomento que consideren la situación socioeconómica de las familias que habitan los hogares aptos para la instalación de SSFVD.

A su vez, los costos de inversión inicial de los SSFVD en Chile difieren por capacidad instalada y segmento. Existen principalmente dos razones que causan esas diferencias de costos de

inversión inicial. Una tiene que ver con la economía de escala, debido a que el tamaño de los sistemas para los PFVR tiende a ser menor que para los prosumidores comerciales y públicos. La otra razón tiene que ver con el hecho de que el segmento de prosumidores público recibe ofertas para la instalación de proyectos FV que compiten entre ella para ser adjudicadas, forzando así a las empresas instaladoras a ofrecer costos de inversión inicial más atractivos para que puedan ser contratadas.

En 2018, el promedio nacional de inversión inicial para el segmento de los PFVR (≤ 5 kWp) fue 12–56 % más alta que para los prosumidores comerciales (5–100 kWp), y 81–93 % más alto que para los prosumidores públicos (10–100 kWp). No obstante, al comparar los costos de inversión con un país con el mercado FV descentralizado maduro, como es el caso de Alemania, se encontró que en el segmento público en Chile (10–100 kWp) la inversión inicial es 9–14 % más baja que en Alemania. Esto se debe a que las licitaciones hechas en el marco del programa gubernamental denominado Techos Solares Públicos fuerzan a las empresas ofertantes a reducir el costo de inversión de un proyecto FV para ser adjudicada como ejecutora. Sin embargo, al contrario de lo que ha ocurrido en el segmento público, la inversión inicial de los segmentos comercial (5–100 kWp) y residencial (≤ 5 kWp) en Chile es 14–27 % y 30 % más alta que en Alemania, respectivamente.

Adicionalmente, la inversión inicial en el segmento de los PFVR varía a lo largo del país. Al comparar los costos promedios de inversión del año 2018 entre las distintas regiones de Chile, se encontró que existe una diferencia de 60 % entre el mínimo (2.101 USD/kWp) y el máximo (3.367 USD/kWp). El costo promedio de inversión inicial mínimo se registró en la región de Coquimbo y, el máximo, en la región de Aysén. Aunque no queda suficientemente probado si existe una correlación entre el costo de inversión inicial y la distancia al centro del país –donde se ubica el puerto principal–, dicha distancia puede ser un indicio de que sea un factor que afecta en los altos costos registrados en la región de Aysén, sumada a su condición de aislamiento con el resto del país.

El costo de inversión inicial de un proyecto FV afecta directamente en su viabilidad económica y financiera. Para el caso de los PFVR, esto supone una barrera importante. Por una parte, bajo la situación de no contar con incentivos a la inversión inicial y el esquema regulatorio en operación (net-billing, donde el precio que se valora el kWh autoconsumido es en promedio 50% menos que el valor que se paga por el kWh consumido de la red), se obtuvieron los resultados del tiempo de recuperación de la inversión que se muestran en la Tabla 5. En dicha tabla se puede observar el amplio rango en años de la recuperación de la inversión que se da a lo largo de Chile para diferentes niveles de autoconsumo y, la cantidad de años asociados a la recuperación de la inversión en la región de Aysén. En cualquier caso, es probable que muy pocos clientes residenciales estén dispuestos a recuperar una inversión en más de 7 años, sobre todo si existen otras necesidades básicas que cubrir.

Tabla 5. Tiempo de recuperación de la inversión (en años) para diferentes porcentajes de autoconsumo. Fuente: [Elaboración propia]

	30% de autoconsumo	50% de autoconsumo	70% de autoconsumo
Rango del país	10,4–23,7	9,0–19,8	8,0–17,0
En la región de Aysén	21,6	18,3	15,8

La tasa interna de retorno (TIR) en el segmento de los PFVR, bajo las condiciones actuales del mercado, también varía significativamente a lo largo de Chile. La Tabla 6 muestra el rango de la TIR obtenido para las capitales regionales de este país a diferentes porcentajes de autoconsumo. Considerando que una inversión tiene sentido, desde un punto de vista de la rentabilidad, cuando la TIR es mayor que la tasa de descuento anual asumida (5 % y 6,24 % en éste caso), se obtuvo que para 30 % de autoconsumo, en 5 (para 5 %) y 2 (para 6,24 %) de 16 ciudades analizadas, la TIR es mayor que la tasa de descuento anual asumida; para 50 % de autoconsumo, el número de ciudades aumenta a 11 y 7, respectivamente; y para 70 % de autoconsumo, solo tres ciudades no tiene una TIR superior a las asumidas. Sin embargo, un nivel de autoconsumo del 70 % en un hogar es una situación poco probable. En el caso de la región de Aysén, tal como se puede deducir desde la Tabla 6, bajo las condiciones actuales del mercado, un proyecto FV residencial no tendría sentido desde un punto de vista económico.

Tabla 6. Tasa interna de retorno para diferentes porcentajes de autoconsumo.

Fuente: [Elaboración propia]

	30% de autoconsumo	50% de autoconsumo	70% de autoconsumo
Rango del país	-0,1–7,8 %	1,4–9,5 %	2,7–11,2 %
En la región de Aysén	0,6 %	2,1	3,4

4.1.2 Oportunidades

En la medida que se aborden y se vayan superando las barreras descritas anteriormente, se podrá ir sacando provecho a las oportunidades detectadas en el marco del objetivo específico 1) de esta tesis doctoral, las cuales se describen a continuación.

Sin duda, una de las oportunidades intrínsecas para los SSFVD en Chile radica en el recurso solar que dispone este país a lo largo de su territorio. No obstante, también se identificaron oportunidades asociadas a programas de fomento, opciones de financiamiento y a una modificación regulatoria.

Dentro del trabajo realizado en el objetivo específico 1) se reveló el inmenso potencial de la tecnología FV en Chile a lo largo de su territorio en comparación con otras regiones del mundo y, en particular, con aquellas que tienen mercados FV maduros en países de Europa.

Tal como se aprecia en la Figura 18, en áreas del norte del país, la radiación global horizontal (GHI, por sus siglas en inglés) supera los 2.500 kWh/m²-año y, esos niveles de GHI, según se desprende de la imagen, no se dan en ninguna otra parte del mundo. En el otro extremo del país, aunque la GHI mínima bordea los 900 kWh/m²-año, existen áreas –donde se encuentran la mayoría de los asentamientos humanos– en que la GHI iguala a la del norte de Francia y supera a la de zonas de Alemania. Tal es el caso de la ciudad de Coyhaique, capital de la región de Aysén ubicada en latitud 45,58° Sur. En este caso particular, Coyhaique cuenta con mejores condiciones solares que la ciudad alemana de Friburgo (1.200 kWh/m²-año), que es una de las ciudades de Europa con más alto nivel de penetración de SSFVD y considerada como referente solar del sector.

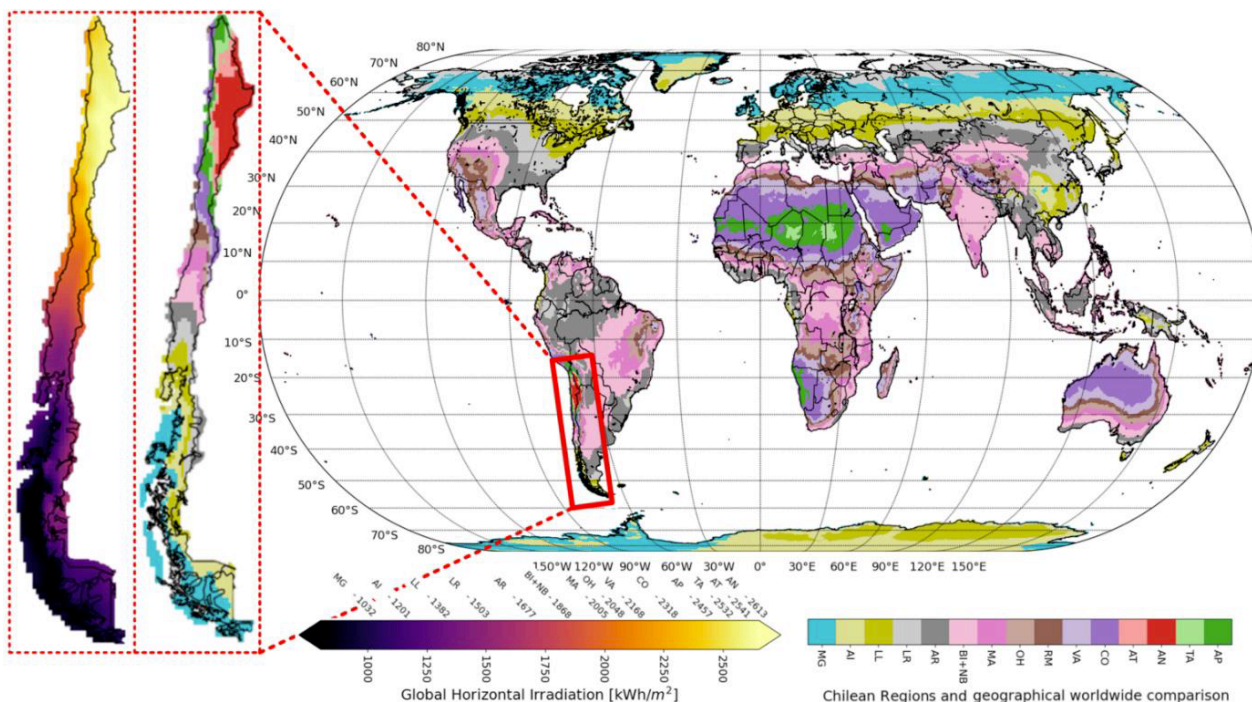


Figura 18. Comparación del potencial solar entre las regiones de Chile y el mundo en términos de irradiación global horizontal. Fuente: [Elaboración propia]

Por otra parte, se identificaron oportunidades entorno a programas de fomento y opciones de financiamiento para los segmentos de prosumidores FV públicos y comerciales, respectivamente. Para el caso del segmento público, existe el Programa de Techos Solares Públicos (PTSP). El PTSP fue creado en el año 2015 con el objetivo de servir de ejemplo en la adopción de energías limpias y más eficientes, a través de la implementación de sistemas solares FV en edificios públicos. En total, se han ejecutado 133 proyectos FV; sin embargo, en 5 de las 16 regiones del país aún no existen proyectos bajo el PTSP, siendo la región de Aysén una de ellas [209]. Esto demuestra el estado incipiente del mercado de los SSFVD en este país. Además de la oportunidad que brinda el estado a través del PTSP, cada región del país tiene asignado fondos destinados para el mejoramiento y construcción de infraestructuras locales, en los cuales se podría incluir un ítem asociado a la implementación de SSFVD.

Para el caso del segmento comercial, existen programas especiales de promoción a la productividad por parte de entidades gubernamentales, algunos de los cuales pueden variar según la región, pero que subsidian entre un 30–100 % la inversión inicial [210]. A su vez, particularmente las pequeñas empresas, cuentan con la opción de financiamiento que puede suplir la falta de capital a través del modelo ESCO (*Energy Service Company*) [211]. Aquí, el capital faltante se paga por medio de los ahorros de energía generados por el autoconsumo. Además, una empresa en Chile, independientemente de su tamaño, tiene más opciones y facilidades para conseguir un crédito bancario que un cliente particular.

Al igual que para los segmentos público y comercial, podrían existir programas de fomento y opciones de financiación para el segmento residencial. En el caso de un subsidio del 30% a la inversión inicial para un PFVR, se lograría igualar el costo de inversión proyectado para el año 2025. El impacto de dicho subsidio a lo largo de Chile en el tiempo de recuperación de la inversión y la TIR

bajo diferentes niveles de autoconsumo se muestra en la Tabla 7. Tal como se puede ver en dicha tabla, sigue existiendo un amplio rango tanto en el tiempo de la recuperación de la inversión como en la TIR, lo cual depende de la zona del país. Sin embargo, al comparar el tiempo de recuperación de la inversión de la Tabla 7 con la Tabla 5, se obtiene que este se reduce en un promedio de 4,8 años. Y, en el caso de la TIR, el subsidio de un 30 % a la inversión inicial puede hacer que un proyecto FV residencial sea rentable en casi todo el país.

Tabla 7. Tiempo de recuperación (TdR) de la inversión en años y y TIR para diferentes porcentajes de autoconsumo en el caso de un incentivo del 30 % a la inversión inicial. Fuente: [Elaboración propia]

	30% de autoconsumo		50% de autoconsumo		70% de autoconsumo	
	TdR	TIR	TdR	TIR	TdR	TIR
Rango del país	7,3–16,6	2,9–12,6 %	6,3–13,8	4,6–14,8 %	5,6–11,9	6,2–17,0 %
En la región de Aysén	15,1	3,8 %	12,8	5,5 %	11,1	7,0 %

A su vez, también para los PFVR, se reveló que un cambio regulatorio de net-billing a net-metering, el cual no compromete recursos financieros del estado, provocaría un escenario económico similar que un subsidio del 30 % y un nivel de 50 % de autoconsumo. Por una parte, bajo un esquema net-metering y aun considerando los altos costos actuales de inversión inicial, el tiempo de recuperación de la inversión (dependiendo de la capital regional) sería de 6,8–14,0 años. En el caso concreto de la región de Aysén (ciudad de Coyhaique), el tiempo de recuperación de la inversión sería de 13,2 años.

Para la TIR, el resultado obtenido depende de la capital regional, oscilando entre el 4,5–13,6 %, mientras que en el caso de la ciudad de Coyhaique (capital de la región de Aysén), el valor del TIR sería de 5,2 %. A su vez, se reveló que un incentivo del 30% para la inversión inicial (que coincide con el costo de inversión proyectado para 2025), y considerando la aplicación de un esquema net-metering y una tasa de descuento anual del 5%, el tiempo de recuperación de la inversión estaría entre 4,8–9,8 años y los valores de la TIR oscilaría entre el 8,5%– 20,2% a lo largo de Chile.

Existe otra alternativa que no implicaría utilizar presupuesto fiscal y consiste en estandarizar la tasa de descuento anual para un valor menor al 5 %. Establecer una tasa de descuento anual para el segmento de PFVR menor al 5 % incrementaría la rentabilidad de un pequeño proyecto FV para clientes residenciales en todo el país y mejoraría el escenario actual de opciones de financiamiento para este segmento, el cual se basa en una tasa de descuento anual de 6.24 %. A su vez, aumentaría la oportunidad de los ciudadanos para obtener financiación, así como ser parte del mercado eléctrico y contribuir a la desfosilización del sector. Esto puede ser parte de una política energética a través de la promoción de esquemas financieros que reduzcan el costo promedio ponderado del capital. Sin embargo, este no ha sido el caso en Chile.

Todo lo anterior, sumando a que se proyecta que los costos de inversión bajarán en el mediano y largo plazo, se prevé que los SSFVD podrán ir teniendo un rol más protagonista en el mix energético. Esto estaría en línea con las tendencias que han mostrado los mercados maduros y con las proyecciones de este tipo de sistemas en escenarios globales.

Las publicaciones en las que se detallan y discuten en profundidad los resultados presentados en esta sección son las siguientes:

Osorio-Aravena J.C., de la Casa J., Töfflinger J.A., Muñoz-Cerón E. (2021). “Identifying barriers and opportunities in the deployment of the residential photovoltaic prosumer segment in Chile”. *Sustainable Cities and Society*, 69, 102824.
<https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102824>

Ascencio-Vásquez J., **Osorio-Aravena J.C.**, Bred K., Muñoz-Cerón E., Topič M. (2021). “Typical Daily Profiles, a novel approach for PV performance assessment: case study on 2.6 GW large-scale PV systems in Chile”. *Solar Energy*, 225 pp 357-374.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.07.007>

4.2 Criterios, factores e indicadores asociados a los sistemas solares FV

Los resultados que se exponen a continuación fueron obtenidos en el marco del objetivo específico 2): “*Identificar criterios, factores e indicadores asociados a los sistemas solares FV que están siendo utilizados en la planificación energética a escala local*”. Este objetivo surgió debido a que la mayoría de las herramientas y técnicas de planificación y análisis de proyectos energéticos se centran mayoritariamente en criterios, factores e indicadores asociados a los aspectos técnicos y económicos. El propósito fue revelar si los trabajos científicos sobre planificación energética espacial están considerando aspectos que van más allá de lo técnico y lo económico (tales como ambiental, social, entre otros); y, llegado el caso, identificar qué criterios, factores e indicadores se emplean y la metodología seguida para su aplicación.

La finalidad de este objetivo fue identificar potenciales beneficios socio-ambientales y socioeconómicos asociados a los sistemas solares FV que podrían sumarse a los factores e indicadores tecno-económicos que normalmente se utilizan en el modelado de escenarios de transición energética.

La Tabla 8 expone los criterios, factores e indicadores identificados en aspectos diferentes a los tecno-económicos. Tal como muestra dicha tabla, 14 de un total de 23 criterios identificados no informan una unidad de medida para obtener un indicador en función de un factor específico. Sin embargo, a la mayoría de estos criterios se les podría asignar un valor para convertirlos en indicador. A su vez, de los 9 criterios restantes, 2 son criterios cualitativos y 7 son cuantitativos. Los criterios cuantitativos son los que tienen factores con los que el criterio se puede convertir en un indicador.

Aunque es en el aspecto social donde se encontraron más criterios, es en el parámetro ambiental donde se detectó más criterios cuantitativos (es decir, factores e indicadores que tiene una unidad de medida). No obstante, tanto los criterios cualitativos como cuantitativos identificados en dichos aspectos son aplicables a los sistemas solares FV. Adicionalmente, algunos de los criterios encontrados dentro del aspecto social se podrían reclasificar como sociocultural, socio-ambiental y socioeconómico. Por ejemplo, el criterio cuantitativo “costo de salud externo” se podrían reclasificar como socio-ambiental y “creación de empleo” como socioeconómico.

Tabla 8. Criterios, factores e indicadores encontrados y que están asociados a los principales aspectos que son distintos a lo técnico y económico. Fuente: [Elaboración propia]

Aspecto	Criterio, factor e indicador	Unidad
Ambiental	Evaluación ambiental estratégica	n.i. ⁱ
	Emisiones de GEI	g CO ₂ eq/kWh
	Uso de suelo	m ² /MWh
	Área requerida	m ² /kW
	Costo ambiental externo	USD/kWh
	Consumo de agua	kg/kWh
	Solución energética baja en carbono	n.i. ⁱ
Político	Objetivos energéticos integrados	n.i. ⁱ
	Instituciones coordinadas para la planificación energética	n.i. ⁱ
	Procedimiento de planificación legitimados	n.i. ⁱ
	Reglamento legal de planificación	n.i. ⁱ
	Procesos participativos	n.i. ⁱ
Social	Participación de los actores interesados	n.i. ⁱ
	Aceptabilidad social	Cualitativo
	Impactos sociales	Cualitativo
	Costo de salud externo	USD/kWh
	Creación de empleo	Empleo-año/GWh
	Riesgo de suministro externo	n.i. ⁱ
	Alteración visual	n.i. ⁱ
	Costo-beneficios previstos	n.i. ⁱ
	Justicia energética	n.i. ⁱ
	Pobreza energética	n.i. ⁱ
	Conocimientos técnicos	n.i. ⁱ

ⁱ No informado.

Además, se encontró que la emisión de GEI es el indicador más utilizado por las herramientas de planificación y modelado energético. La herramienta de modelado energético utilizada en el marco del trabajo desarrollado en esta tesis doctoral, además de los aspectos técnico y económico, incluye un criterio ambiental; cuyo indicador es la emisión de GEI (MtCO₂eq). Otros indicadores se podrían obtener utilizando directamente algún factor de referencia junto a los kWh o kW resultantes del modelado; por ejemplo, tales como el uso de suelo, el área requerida y el consumo de agua. Sin embargo, para el caso del indicador de creación de empleo, podría ser impreciso, ya que, existen métodos que utilizan diferentes factores según cada parte de la cadena de valor de la tecnología [208].

La publicación en la que se detallan y discuten en profundidad los resultados presentados en esta sección es la siguiente:

Osorio-Aravena J.C., Frolova M., Terrados J., Muñoz-Cerón E. (2020). “Spatial Energy Planning: A Review”. *Energies*, 13(20), 5379. <https://doi.org/10.3390/en13205379>

4.3 El rol de la energía solar FV descentralizada en la transición energética en función del enfoque territorial del modelado

Los resultados que se exponen a continuación fueron obtenidos en el marco del objetivo específico 3): “*Modelar escenarios de transición energética hacia un sistema 100 % basado en energías renovables para Chile, usando diferentes enfoques de aplicación*”. Para la consecución de este objetivo se modelaron escenarios energéticos al año 2050 aplicados desde un enfoque global y local. En ambos enfoques se contempló la proyección de la demanda de energía final de todas las actividades –y sub-actividades– que consumen energía en Chile, y que fueron agrupadas en cuatro sectores: eléctrico, térmico, transporte y desalinización. Este ha sido el primer trabajo científico en que se aplica este tipo de modelado a este país.

Para el caso del modelado desde un enfoque global, se simuló un escenario energético en que se consideró a Chile como un nodo de consumo de energía ubicado en la capital del país. Para el modelado desde un enfoque local, Chile se sub-dividió en seis macro-zona donde en cada una de ellas se asignó un nodo de consumo de energía. Bajo esta última estructura territorial, se simularon cuatro escenarios de transición energética: i) escenario que contiene las metas gubernamentales para el sector energético presentadas en la COP25 con el fin de lograr la neutralidad en las emisiones de GEI al 2050; ii) escenario que no tiene ningún objetivo respecto a la participación de las energías renovables al 2050; iii) escenario con el objetivo de alcanzar un sistema 100% basado en energías renovables al 2050, en el cual se aplicó una restricción para el intercambio de electricidad a través de la red de transmisión entre macro-zonas, con el fin de permitir una mayor utilización de los recursos energéticos locales y; iv) escenario con el objetivo de alcanzar un sistema 100% basado en energías renovables al 2050, pero sin restricciones de intercambio de electricidad entre macro-zonas a través de la red de transmisión.

En términos generales, los resultados sugieren que una transición para lograr en Chile un sistema energético 100 % basado en fuentes renovables al 2050, es técnicamente factible y económicamente viable. Para lograr dicha transición, desde una perspectiva tecnológica, se identificaron como elementos vitales: un alto nivel de electricidad renovable en todos los sectores, flexibilidad (proporcionada por los sistemas de almacenamiento de energía y el acoplamiento de los sectores) y producción de combustibles sostenibles (basados en *PtX*).

Para una solución óptima en términos de costos, se identificaron tres habilitadores claves: la tecnología solar FV, la interconexión macro-zonal y el acoplamiento de los sectores. Todo esto, implicaría usar menos del 10 % del potencial tecno-económico de energía renovable con que cuenta Chile. A su vez, los escenarios de transición energética 100 % renovables podrían ser, desde el año 2035 en adelante, más costo-eficientes que el escenario político actual propuesto para lograr la neutralidad en las emisiones de carbono al 2050. En los escenarios 100 % renovables las emisiones netas de GEI del sector energético se reducirían a cero. Esto, no solo implicaría que Chile se podría convertir en un país con emisiones de GEI negativas, sino que también, se convertiría en un país libre del uso de combustibles fósiles con fines energéticos. Además, los resultados revelaron que la escasez de agua proyectada para Chile podría ser cubierta por desalinización de agua de mar basada en fuentes de energía renovable.

En el modelado desde un enfoque global, del cual se obtienen resultados a nivel nacional a partir de un punto geográfico sin estimar su distancia a la que están ubicados los mejores recursos energéticos renovables del territorio, se consideró a Chile como un solo nodo consumidor de energía –localizado en la capital del País. En este caso, se obtuvieron resultados por sector, con la excepción de que solo los sectores eléctrico y térmico se contemplaron acoplados.

En el modelado desde un enfoque local, del cual se obtienen resultados a nivel sub-nacional desde puntos geográficos repartidos por el territorio de un país, Chile fue subdividido en seis macro-zonas; en cada una de ellas se asignó un nodo principal de consumo de energía. La región de Aysén fue considerada como una de las seis macro-zonas, cuyo nodo principal de consumo fue localizado en su capital regional, la ciudad de Coyhaique. En este caso, se consiguieron resultados a nivel sub-nacional (por macro-zona) que, al sumarlos, se obtienen resultados a nivel nacional. Además, en el modelado desde un enfoque local, se consideró lograr un sistema energético con todos los sectores acoplados y, los seis nodos interconectados eléctricamente.

En el modelado desde un enfoque global, en el cual se simuló solo un escenario de transición energética, el 78 % de la demanda de energía primaria en el 2050 se cubriría con electricidad. Esta electricidad primaria sería producida por tecnologías de energía renovable. La Tabla 9 muestra la porción por tipo de tecnología correspondiente al total de la capacidad instalada requerida para generar electricidad en el año 2050 en el escenario modelado desde un enfoque global. En dicha tabla se puede observar que los sistemas FV acumulan el 54 % de la capacidad total instalada y, que los prosumidores FV superan en capacidad instalada a la FV de ángulo fijo, la hidroeléctrica y otras renovables juntas (concentración solar de potencia, biomasa y geotérmica).

Tabla 9. Porción de capacidad instalada por tecnología renovable en el 2050 para el escenario de transición energética desde un enfoque global. Fuente: [Elaboración propia]

FV ángulo fijo	FV eje variable	Prosumidores FV	Eólica	Hidroeléctrica	Otras
6 %	31 %	17 %	31 %	11 %	4 %

Tal como se puede ver en la Figura 19 (izquierda), la electricidad proveniente desde los SSFVD (prosumidores FV) aumenta sostenidamente hasta el año 2040, al igual que la eólica terrestre (wind onshore) y de manera similar que la FV con seguidor a un eje (PV single-axis). Para el 2050, los sistemas FV en conjunto contribuirían con un 39 % del total de la electricidad generada para cubrir la demanda de energía de todos los sectores, y solo los SSFVD contribuirían con un 12 %. No obstante, del total de la electricidad generada para cubrir la demanda de energía final de los sectores eléctrico y térmico, su contribución asciende a un 24 % (ver Figura 19, derecha). En cualquier caso, la contribución de los SSFVD respecto al total de la demanda final de electricidad sería de un 27 %. Esta electricidad, además de ser utilizada para los distintos consumos finales actuales, se usaría en tecnologías de calefacción y transporte, principalmente, dentro de las ciudades.

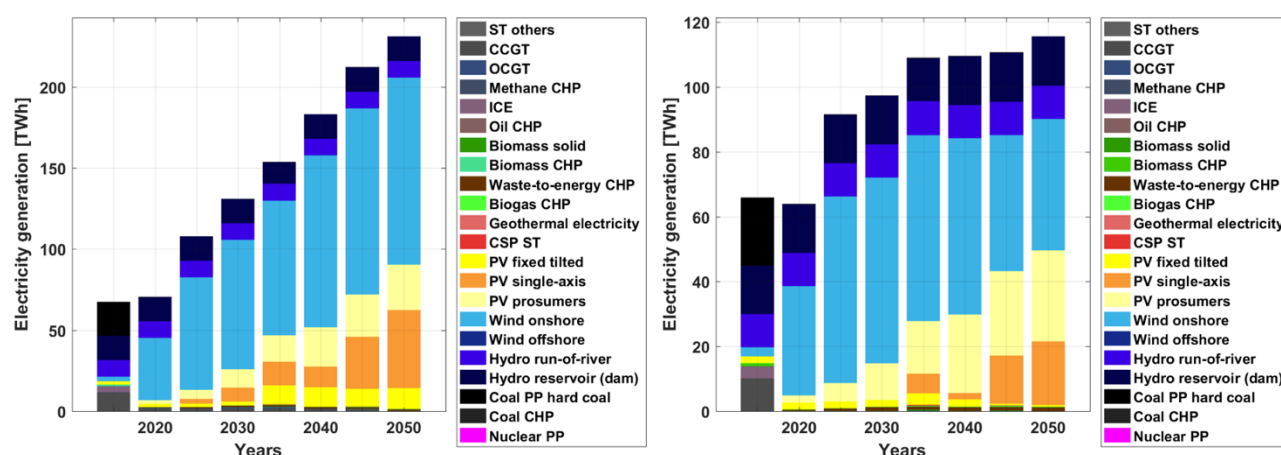


Figura 19. Generación de electricidad por tecnología para cubrir demanda de energía de todos los sectores (izquierda) y para los sectores eléctrico y térmico (derecha), durante el periodo de transición.

Fuente: [Elaboración propia]

De los cuatro escenarios de transición energética que se modelaron para Chile desde un enfoque local, dos de ellos fueron establecidos con el propósito de lograr un sistema 100 % basado en fuentes renovables al 2050. Los resultados que se presentan a continuación, corresponden al escenario para lograr un sistema energético 100 % renovables en el que se aplicó una restricción para el intercambio de electricidad a través de la red de transmisión inter-zonal, con el propósito de permitir una mayor utilización de los recursos locales de cada macro-zona. Esta restricción no es posible aplicarla para un país en el modelado desde un enfoque global, ya que este es considerado como un solo nodo de consumo en un punto geográfico específico, el cual es abastecido con los recursos energéticos disponibles a lo largo del territorio sin considerar la distancia en que estos están ubicados al punto de consumo. Es decir, el enfoque local del modelado permite que los resultados asociadas a las tecnologías requeridas a nivel nacional, sean más cercanos a la realidad que cuando se considera al país como un solo nodo de consumo en el modelado desde un enfoque global, ya que los resultados de las tecnologías requeridas están dados en función de los recursos disponibles que abastecen la demanda de energía desde un nivel sub-nacional.

En el escenario de transición energética para Chile desde un enfoque local, el 77 % de la demanda nacional de energía primaria en el año 2050 sería cubierta con electricidad. La Tabla 10 muestra la participación en la generación de electricidad renovable para dicho año, por tecnología. En este caso, los sistemas FV en su conjunto contribuirían con el 87 % de la electricidad generada y, los SSFVD superan en contribución a la eólica, la hidroeléctrica y otras renovables. Esto demuestra una diferencia significativa en relación a los resultados de la participación de las tecnologías según el enfoque del modelado. Por ejemplo, para el caso del enfoque global del modelado, la contribución de la solar FV en su conjunto fue de un 39 % y, para el enfoque local, arrojó un 87 %.

Tabla 10. Porción de generación de electricidad renovable por tecnología en el 2050 para el escenario de transición energética desde un enfoque local. Fuente: [Elaboración propia]

FV ángulo fijo	FV eje variable	Prosumidores FV	Eólica	Hidroeléctrica	Otras
50 %	26 %	11 %	3 %	6 %	4 %

Tal como se puede ver en la Figura 20, tanto la capacidad instalada como la electricidad generada de los SSFVD aumenta sostenidamente durante todo el periodo de transición energética, al igual que los sistemas solares FV centralizados. Del total de la capacidad instalada requerida para generar electricidad en el año 2050, un 13 % correspondería a prosumidores FV (ver Figura 20, izquierda). A su vez, la electricidad proveniente desde los SSFVD contribuiría en un 11 % al total de la electricidad generada para cubrir la demanda de energía de todos los sectores (ver Figura 20, derecha). No obstante, la contribución de los SSFVD respecto al total de la demanda final de electricidad sería de un 32 %, la cual, se consume directamente en ciudades por los sectores eléctrico, térmico y transporte.

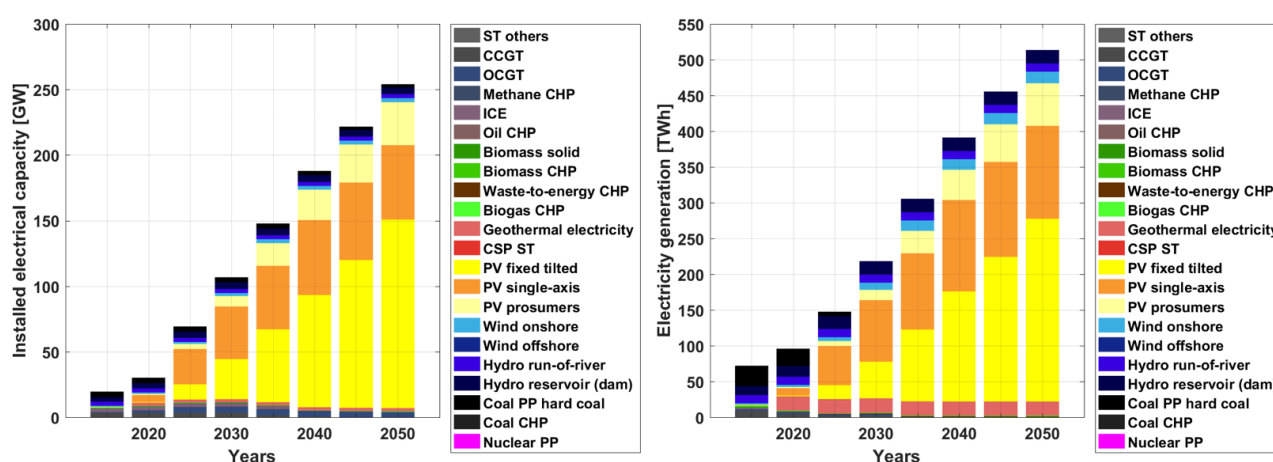


Figura 20. Capacidad instalada (izquierda) y generación de electricidad (derecha) por tecnología para cubrir demanda de todos los sectores durante el periodo de transición. Fuente: [Elaboración propia]

Aunque los resultados de la contribución de los SSFVD en la generación de electricidad primaria son similares en los modelados de enfoque global y local, su contribución a la demanda final de electricidad aumenta en cinco puntos porcentuales en el modelado desde un enfoque local (de 27 % a 32 %). A diferencia del modelado desde un enfoque global, en el modelado desde un enfoque local se simuló la transición energética para Chile considerando seis nodos de consumo de energía repartidos a lo largo del territorio como macro-zonas. Esto permite hacer un análisis considerando los recursos energéticos locales correspondientes a los territorios y centros de consumo de un país, lo cual, no es considerado desde un enfoque global.

Tal como se puede deducir al comparar las figuras 19 y 20, el análisis desde un enfoque sub-nacional se tradujo en un aumento significativo de la contribución solar FV en su conjunto y una reducción de la eólica terrestre. Básicamente, esto se debe a que los grandes potenciales de energía solar en Chile se localizan en el extremo norte, cerca de donde se ubica la mayor demanda de energía, y los grandes potenciales de energía eólica se ubican en el extremo sur. Es decir, el potencial de energía eólica está en las antípodas de los principales centros de consumo del país. En efecto, es aquí donde cobra relevancia el análisis desde un enfoque local y a una escala sub-nacional en el modelado de escenarios de transición energética, tal como se puede apreciar en la Figura 21. Específicamente, debido a que, en el modelado desde un enfoque global, no hay resultados de las tecnologías requeridas a un nivel sub-nacional ni se consideran las particularidades de la demanda energética de cada territorio.

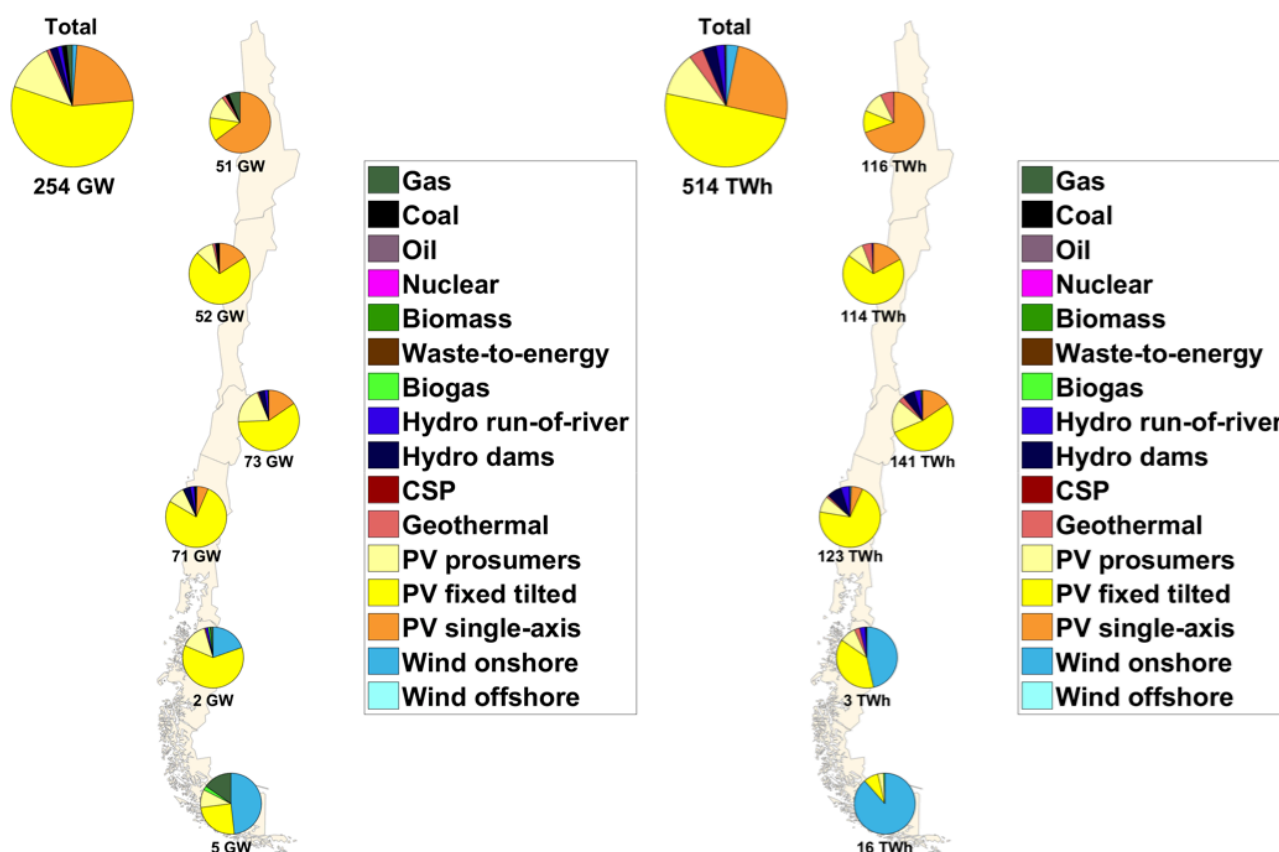


Figura 21. Capacidad instalada (izquierda) y generación de electricidad (derecha) por tecnología y macro-zona para cubrir demanda de energía para todos los sectores en el año 2050.

Fuente: [Elaboración propia]

Para el caso de la región de Aysén, a diferencia de lo que ocurre a nivel nacional, en esta macro-zona hay menor demanda de energía en general, y de electricidad en particular, debido a una baja actividad industrial en el territorio. Además, existe una mayor demanda térmica, que en gran medida seguiría siendo cubierta por el recurso energético biomásico. No obstante, según el resultado del modelado, el 51 % de la demanda de energía primaria de esta zona del país en el 2050 sería cubierta con electricidad. En ese año, la energía solar FV en su conjunto contribuiría con el 46 % de la electricidad generada en esta región, y del total de la capacidad instalada requerida para generar electricidad en el año 2050 en la región de Aysén, un 14 % correspondería a SSFVD (ver Figura 21, izquierda).

A su vez, la electricidad proveniente desde los SSFVD contribuiría en un 9 % al total de la electricidad generada para cubrir la demandada de energía de todos los sectores en la región de Aysén (ver Figura 21, derecha). Sin embargo, la contribución de los SSFVD respecto al total de la demanda final de electricidad en esta región sería de un 52 %, la cual se consumiría directamente en ciudades por los sectores eléctrico, térmico y transporte.

Por lo tanto, estos resultados sugieren que, aunque el potencial de energía solar en la macro-zona de la región de Aysén es significativamente menor que el de la zona norte del país, la tecnología FV también podría jugar un rol importante en la transición energética y en un sistema energético sostenible del futuro. En el caso de la tecnología FV descentralizada en particular, su papel puede ser

más significativo aún que a nivel nacional, pero a escala urbana. Este resultado no puede vislumbrarse en el modelado desde un enfoque global.

Por otra parte, además del análisis asociado a los aspectos tecno-económicos de la transición energética sostenible para Chile y su correspondiente reducción de la emisión de GEI, se realizó una primera evaluación socio-económica respecto al potencial de creación de empleos directos asociados a diversas tecnologías utilizadas para la generación de energía (eléctrica y térmica), la producción de combustibles y el almacenamiento energético, junto con las de transmisión y distribución de electricidad. Todo esto fue estimado para una transición energética global entre los años 2020 y 2050. A partir de este enfoque global, se obtuvieron resultados de creación de empleos directos para Chile. Es decir, estos resultados solo se basan en el escenario de transición energética modelado desde un enfoque global.

La Tabla 11 muestra tanto el total de los empleos directos que se crearían en Chile bajo dicho escenario de transición energética como los empleos que se crearían en torno a la tecnología solar FV en su conjunto y a los SSFVD. De la Tabla 11 se puede deducir que la tecnología solar FV en su conjunto crearía un total de 526.236 empleos directos durante el periodo de transición. Tal como se puede ver en dicha tabla, la creación de empleos asociados a los SSFVD correspondería a un rango de 9-15 % del total de empleos a nivel país, que se crearían en los periodos de 5 años durante el escenario de transición energética en cuestión. Esto significa que en Chile se crearían 174.274 empleos directos asociados a los SSFVD entre los años 2020 y 2050.

Tabla 11. Creación de empleos directos durante la transición energética para Chile hacia un sistema energético 100 % renovable al 2050 considerando todos los sectores. Fuente: [Elaboración propia]

	2020-25	2025-30	2030-35	2035-40	2040-45	2045-50
Total empleos del país	232.349	220.290	200.004	245.760	246.100	324.492
Total empleos FV	56.061	74.949	74.839	98.403	89.506	132.479
	24 %	34 %	37 %	40 %	36 %	41 %
Empleos SSFVD	20.304	32.810	30.121	32.737	27.126	31.176
	9 %	15 %	15 %	13 %	11 %	10 %

Debido al enfoque global de esta primera estimación de la creación de empleos directos, el cual consideró a Chile como un solo nodo consumidor de energía, los resultados que se obtuvieron son solo a nivel nacional. Esto implica que no hay resultados para la región de Aysén.

De manera similar a lo que se reveló al comparar el modelado desde los enfoques global y local, es probable que la contribución en la creación de empleos de los SSFVD sea más significativa que la de los resultados desde un enfoque global. Por lo tanto, se torna necesario adaptar la herramienta metodológica desarrollada para estimar la creación de empleos directos hacia un enfoque local.

Las publicaciones en las que se detallan y discuten en profundidad los resultados presentados en esta sección son las siguientes:

Osorio-Aravena J.C., Aghahosseini A., Bogdanov D., Caldera U., Muñoz-Cerón E., Breyer C. (2020). “Transition toward a fully renewable-based energy system in Chile by 2050 across power, heat, transport and desalination sectors”. *International Journal of Sustainable Energy Planning and Management*, 25 pp. 77-94.
<https://doi.org/10.5278/ijsepm.3385>

Osorio-Aravena J.C., Aghahosseini A., Bogdanov D., Caldera U., Ghorbani N., Mensah T.N.O., Muñoz-Cerón E., Breyer C. (2021). “The impact of renewable energy and sector coupling on the pathway towards a sustainable energy system in Chile”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 151, 111557. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111557>

Ram M., **Osorio-Aravena J.C.**, Aghahosseini A., Bogdanov D., Breyer C. (2022). “Job creation during a climate compliant global energy transition towards 100 % renewable energy across the power, heat, transport and desalination sectors by 2050”. *Energy*, 238, Part A, 121690. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121690>

5. Conclusiones

Debido al importante papel que puede desempeñar la tecnología solar FV en los sistemas energéticos del futuro, esta tesis doctoral tuvo como objetivo principal explorar el rol que podrían jugar los SSFVD en la transición energética sostenible para Chile y la región de Aysén, tanto desde un enfoque global como local. Para ello, el trabajo de investigación se centró en los siguientes aspectos asociados a los SSFVD: (i) la identificación de barreras y oportunidades para su despliegue; (ii) la identificación de criterios, factores e indicadores que se utilizan en la planificación energética a escala local, y; (iii) el análisis de su rol en escenarios de transición hacia un sistema energético basado 100 % en fuentes renovables.

Dentro de las principales contribuciones científicas generadas en el marco del trabajo de investigación de esta tesis doctoral, destacan: i) un enfoque metodológico para analizar los parámetros tecno-económicos que influyen en el mercado de PFVR, enfoque que evalúa desde la perspectiva tanto tecno-económica como de los formuladores de políticas; ii) el primer análisis comparativo del modelado de transición energética hacia un sistema 100 % renovable para un país, desde un enfoque global y local, y; iii) la primera estimación del potencial de creación de empleo a nivel mundial de las tecnologías de almacenamiento de energía y *e-fuels*, desde una perspectiva a largo plazo.

Algunas de las conclusiones generales que han surgido de este trabajo de investigación, y que van más allá del análisis sobre los SSFVD, pero que no por ello son menos importante, son:

- **Una transición energética hacia un sistema 100 % renovable en Chile es técnicamente factible y económicamente viable.** Para lograr dicha transición, desde una perspectiva tecnológica, se identificaron como elementos vitales: un alto nivel de electricidad renovable en todos los sectores, flexibilidad (proporcionada principalmente por los sistemas de almacenamiento de energía) y producción de combustibles sostenibles (basada en *PtX*). Para una solución óptima en términos de costos, se identificaron tres habilitadores claves: la tecnología solar FV, la interconexión macro-zonal y la integración sectorial (o el acoplamiento de los sectores). Sin embargo, los cambios tecnológicos que habría que realizar no están asegurados. A su vez, estos resultados tampoco responden a cómo se podría llevar a cabo la transición energética en cada región y ciudad del país.
- **Una transición energética en Chile hacia un sistema 100 % renovable al 2050 cumpliría con la mayoría de los criterios que forman parte de las tres dimensiones de la sostenibilidad.** Esta transición energética podría ser, desde el año 2035 en adelante, más costo-eficiente que el escenario político actual propuesto para lograr la neutralidad en las emisiones de carbono al 2050. Esto, no solo implicaría que Chile se podría convertir en un país con emisiones de GEI negativas desde antes del 2050, sino que también, se convertiría en un país libre del uso de combustibles fósiles con fines energéticos. Además, en dicho escenario de transición, la escasez de agua proyectada para este país sería cubierta por desalinización de agua de mar basada en fuentes renovables. Todo esto, implicaría usar menos del 10 % del potencial tecno-económico de energía renovable con que cuenta Chile.

- **Es más importante apostar por una desfosilización total del sistema energético en todos los sectores, en lugar de alcanzar la neutralidad en las emisiones de carbono.** Esto, implicaría orientar las transiciones de una manera consistente con los objetivos climáticos la COP21 en París. Adicionalmente, esto supone impulsar un sistema energético más descentralizado y participativo que, a su vez, permitiría alcanzar un sistema energético realmente sostenible, obteniendo beneficios socio-ambientales y socioeconómicos.

Adicionalmente, dentro de las principales conclusiones de esta tesis doctoral, se tiene que:

- **El recurso solar con que cuenta Chile a lo largo de su territorio, en comparación al resto del mundo, lo sitúa en un lugar privilegiado para el despliegue de los SSFVD.** En las zonas más desfavorables existen áreas donde están emplazadas ciudades en que los niveles de irradiación igualan al norte de Francia y supera a zonas de Alemania; dos países con mercados de SSFVD maduros. Tal es el caso de la ciudad de Coyhaique, capital de la región de Aysén, la cual, tiene mejores condiciones solares que Friburgo (1.200 kWh/m²-año), ubicada en Alemania –una de las ciudades de Europa con más alto nivel de penetración de SSFVD y considerada como referente solar del sector.
- **Tanto en Chile como en la región de Aysén, los SSFVD están en una etapa incipiente, pero, con un enorme potencial por explotar.** En el caso de los PFVR, más del 99 % de los hogares que son técnicamente aptos para instalar un sistema FV de 2 kWp aún no tiene instalado un sistema de estas características. En otras palabras, solo existen alrededor de 7.000 PFVR de un universo potencial de 1,13 millones.
- **Las principales barreras que han obstaculizado el despliegue de los PFVR en Chile son los altos costos de inversión inicial de los proyectos FV de tamaño pequeño y los bajos ingresos por hogar.** En 2018, el costo de inversión inicial estaba en un rango de 2.101–3.367 USD/kWp, dependiendo de la zona del país, mientras que un 68 % de las familias tuvo un ingreso mensual inferior a 1.750 USD, que es el considerado como promedio nacional. El ingreso mensual por familia es un factor clave que no está siendo considerado por las técnicas econométricas más comunes utilizadas para evaluar proyectos FV de pequeña escala.
- **El despliegue de los SSFVD en Chile puede ser acelerado a través de decisiones políticas sin comprometer dinero del presupuesto del estado para llevarlas a cabo.** Una de ellas es ejecutar un cambio regulatorio de net-billing a net-metering. Y, la otra, es realizar una estandarización de una tasa de descuento menor al 5 % para las opciones crediticias y de financiamiento. Esto provocaría que, dependiendo de la zona específica del país: se reduzca el tiempo de recuperación de la inversión inicial de un rango de 9–19,8 a 6,8–14,0 años y, se aumente la TIR de un rango de 1,4–9,5 % a 4,5–13,6 %. No obstante, si se implementa un incentivo monetario del 30 % a la inversión inicial, bajo un esquema net-metering, el tiempo de recuperación de la inversión estaría entre 4,8–9,8 años y los valores de la TIR oscilaría entre el 8,5–20,2 %, a lo largo de Chile.
- **Las herramientas de planificación energética utilizan un rango acotado de criterios, factores e indicadores que van más allá de los aspectos técnico y económico.** El factor,

criterio e indicador más utilizado por las herramientas de planificación energética es el asociado a las emisiones de GEI o $\text{CO}_{2\text{ep}}$, que corresponde a un aspecto ambiental. Aunque existen otros criterios, factores e indicadores, éstos no se encuentran estandarizados, y algunos de ellos, requieren profundizar en su análisis. Por lo tanto, se torna necesario seguir indagando sobre criterios, factores e indicadores tales como: costo ambiental externo, costo de salud externo y creación de empleo. Estos servirán para obtener argumentos objetivos que pueden contribuir a acelerar el despliegue de la tecnología solar FV descentralizada, y otras renovables, ya que, si se aplicaran, se podrían entender los beneficios socio-ambientales y socioeconómicos que los SSFVD pueden brindar durante la transición energética hacia sistemas totalmente desfosilizados.

- **Cuando se analiza la transición energética de un país desde un enfoque global, se pierde precisión en lo que ocurre a escala local, pudiendo esto llevar a resultados que subestiman la contribución de una tecnología específica.** En el caso concreto que nos atañe, desde un enfoque global, no se puede conocer la contribución de los SSFVD (ni de cualquier tecnología) a nivel sub-nacional. Tal y como los resultados de esta tesis doctoral muestran, el rol de la tecnología solar FV descentralizada es más significativo cuando se analiza una transición energética desde un enfoque local que global. La contribución de los SSFVD en Chile al 2050 respecto al total de la demanda final de electricidad sería: 27 % desde un enfoque global y 32 % desde un enfoque local y, para el caso de la región de Aysén sería de un 52 % (a pesar de que cuenta con un recurso solar menor que el resto del país).

Con todo esto, se confirma la hipótesis de partida de esta investigación: *el análisis de una transición energética sostenible desde un enfoque local revela un rol y un impacto de la tecnología solar FV descentralizada más significativo que el de un análisis desde un enfoque global*. Por lo tanto, se torna necesario que los análisis de transición energética se hagan, como mínimo, desde un enfoque nacional y sub-nacional, pero, idealmente, desde un enfoque más local, por ejemplo, a escala provincial. En este sentido, los SSFVD pueden tener un papel clave, principalmente en las ciudades. Sin embargo, el rol que estos sistemas pueden jugar en la transición energética y sus múltiples beneficios socio-ambientales y socioeconómicos, recién se están comenzando a revelar.

Finalmente, según IRENA [11] "*Las transiciones energéticas jugarán un papel vital en nuestra capacidad común para superar la crisis de salud y salir del camino hacia una crisis climática más profunda*". Sin embargo, para garantizar una transición energética realmente sostenible y alcanzar un sistema energético totalmente desfosilizado, las políticas del sector adquieren una importancia fundamental [212]. Lograr la transición energética que se requiere dependerá en gran medida de la voluntad política. Las iniciativas políticas pueden y deben conducir y acelerar el remplazo de los combustibles fósiles. En particular, el papel de las políticas de promoción y algunos cambios regulatorios serán esenciales para el despliegue de los SSFVD. Es decir, las políticas y regulaciones nacionales con implicaciones para las ciudades pueden alentar a sus residentes a apoyar la transición energética [34]. En este sentido, la energía solar FV es un elemento vital. Esta tecnología, además de contribuir a acelerar la desfosilización a través de una transición energética más descentralizada y participativa, puede contribuir en la generación de beneficios socio-ambientales y socioeconómicos a escala local, con repercusión global.

Conclusions

Due to the important role that solar photovoltaic (PV) technology can play in future energy systems, this doctoral thesis had as its main objective to explore the role that decentralized solar PV systems (DSPVS) could play in the sustainable energy transition for Chile and the Aysén region, both from a global and a local approach. To this end, the research work focused on the following aspects associated with DSPVS: (i) the identification of barriers and opportunities for their deployment; (ii) the identification of criteria, factors, and indicators that are used in energy planning at the local level; and (iii) the analysis of their role in transitioning to an energy system based on 100 % renewable sources.

Among the main scientific contributions generated from the research work of this thesis, the following stand out: i) a methodological approach to analyzing the techno-economic parameters that influence the residential PV prosumer market, an approach that assesses both from the techno-economic and the policy-making perspective; ii) the first comparative analysis of energy transition modelling towards a 100 % renewable system for a country, from a global and local approach; and iii) the first estimation of the global job creation potential of energy storage technologies and e-fuels, from a long-term perspective.

Some of the general conclusions that have emerged from this research work that go beyond the analysis of DSPVS, but which are no less important, are:

- **An energy transition towards a 100 % renewable system in Chile is technically feasible and economically viable.** To achieve this transition, from a technological perspective, the following were identified as vital elements: a high level of renewable electricity in all sectors, flexibility (provided mainly by energy storage systems) and sustainable fuel production (based on PtX). For an optimal solution in terms of costs, three key enablers were identified: solar PV technology, macro-zonal interconnection, and sector integration (or sector coupling). However, the technological changes that would have to be made are not assured. In turn, these results do not respond to how the energy transition could be carried out in each region and city of the country.
- **An energy transition in Chile towards a 100 % renewable system by 2050 would meet most of the criteria that are part of the three dimensions of sustainability.** This energy transition could be from 2035 onwards, more cost-efficient than the current political scenario proposed to achieve carbon neutrality by 2050. This would not only imply that Chile could become a negative CO₂ emitter country before 2050, but it would become a country free from the use of fossil fuels for energy purposes. Furthermore, in the said transition scenario, the projected water scarcity for this country would be covered by the desalination of seawater based on renewable sources. All this would imply using less than 10% of the techno-economic potential of renewable energy that Chile has.

- **It is more important to bet on a total defossilization of the energy system in all sectors, instead of on achieving carbon neutrality.** This would imply guiding the transitions in a manner consistent with the climate objectives of COP21 in Paris. Additionally, this would mean promoting a more decentralized and participatory energy system that, in turn, would allow a truly sustainable energy system to be achieved, with socio-environmental and socio-economic benefits.

Additionally, among the main conclusions of this doctoral thesis, we have the following:

- **The solar resources that Chile has throughout its territory, compared to the rest of the world, places it in a privileged place for the deployment of DSPVS.** In the most unfavorable areas, cities are located in zones in which the irradiation levels are equal to the north of France and exceed parts of Germany, two countries with mature DSPVS markets. Such is the case in the city of Coyhaique, the capital of the Aysén region, which has better solar conditions than Freiburg (1,200 kWh/m²-year), Germany, one of the cities in Europe with the highest levels of penetration of DSPVS, considered to be a solar benchmark in the sector.
- **Both in Chile and in the Aysén region DSPVS are in the incipient stage, with enormous untapped potential.** In the case of residential PV prosumers (RPVP), more than 99 % of households that would be technically capable of installing a 2 kWp PV system have not yet installed such a system. In other words, there are only about 7,000 RPVP out of a potential universe of 1.13 million.
- **The main barriers that have hampered the deployment of RPVP in Chile are the high initial investment costs of small-sized PV projects and the low income per household.** In 2018, the initial investment cost was in the range of 2,101–3,367 USD/kWp, depending on the area of the country, while 68 % of families had a monthly income of less than 1,750 USD, which is considered the average national. Monthly income per family is a key factor that is not being considered by the most common econometric techniques used to evaluate small-scale PV projects.
- **The deployment of DSPVS in Chile can be accelerated through political decisions without committing money from the state budget to carry them out.** One way is to execute a regulatory change from net-billing to net-metering scheme. And another is to standardize a discount rate of less than 5% for credit and financing options. The effect of this, depending on the specific area of the country the payback time of the initial investment is reduced from a range of 9–19.8 to 6.8–14.0 years, and the internal rate return (IRR) of a range is increased from 1.4–9.5 % to 4.5–13.6 %. However, if an initial investment incentive of 30 % is implemented, under a net-metering scheme, the investment payback time would be between 4.8–9.8 years and the IRR values would oscillate between 8.5–20.2 %, throughout Chile.

- **Energy planning tools use a limited range of criteria, factors, and indicators that go beyond technical and economic aspects.** The factor, criterion, and indicator most used by the energy planning tools are associated with greenhouse gas or CO_{2ep} emissions, which corresponds to an environmental aspect. Although there are other criteria, factors, and indicators these are not standardized and some of them require further analysis. Therefore, it becomes necessary to continue investigating criteria, factors, indicators such as external environmental cost, and external health cost and job creation. These will serve to obtain objective arguments that can contribute to accelerating the deployment of decentralized solar PV technology, and other renewables. If it is applied, the socio-environmental and socioeconomic benefits that DSPVS can provide during the energy transition towards fully defossilised systems could be understood.
- **When the energy transition of a country is analyzed from a global perspective, precision in what happens at the local scale is lost, which can lead to results that underestimate the contribution of a specific technology.** In the specific case that concerns us from a global approach, it is not possible to know the contribution of the DSPVS (or any technology) at the sub-national level. As the results of this doctoral thesis show, the role of decentralized solar PV technology is more significant when analyzing an energy transition from a local rather than a global approach. The contribution of the DSPVS in Chile by 2050, with respect to the total final electricity demand would be 27 % from a global approach and 32 % from a local approach. In the case of the Aysén region, it would be 52 % locally, despite the fact that it has fewer solar resources than the rest of the country.

With all this, the starting hypothesis of this research is confirmed: *the analysis of a sustainable energy transition from a local approach reveals a more significant role for and impact of decentralized solar PV technology than an analysis from a global approach*. Therefore, it's necessary for energy-transition analyses to be carried out, at a minimum, from a national and sub-national approach, but ideally from a more local approach, for example, at the provincial level. In this sense, DSPVS can play a key role, mainly in cities. However, the role that these systems can play in the energy transition, and its multiple socio-environmental and socio-economic benefits are only just beginning to be revealed.

Finally, according to IRENA [11] "*Energy transitions will play a vital role in our common ability to overcome the health crisis and get off the road to a deeper climate crisis.*" However, to ensure a truly sustainable energy transition and achieve a fully defossilised energy system, sector policies are of fundamental importance [212]. Achieving the required energy transition will depend largely on political will. Policy initiatives can and should drive and accelerate the replacement of fossil fuels. In particular, the role of promotion policies and some regulatory changes will be essential for the deployment of DSPVS. That is, national policies and regulations with implications for cities can encourage their residents to support the energy transition [34]. In this sense, solar PV is a vital element. This technology, in addition to helping to accelerate defossilization through a more decentralized and participatory energy transition, can contribute to the generation of socio-environmental and socio-economic benefits at a local scale, with global repercussions.

6. Nuevas líneas de investigación

El rol que pueden jugar los SSFVD en la transición energética a escala local desde una perspectiva del modelado energético, así como también los beneficios socio-ambientales y socioeconómicos que pueden brindar, recién se están comenzando a revelar. En este sentido, y con miras a encontrar vías que permitan acelerar el despliegue de los SSFVD, a continuación, se exponen algunas de las nuevas líneas de investigación que se detectaron en el marco del trabajo realizado en esta tesis doctoral:

- **Factores e indicadores socio-ambientales asociados a los SSFVD más allá de la descarbonización.** Además de las emisiones de GEI, existen otros contaminantes atmosféricos asociados al sector energético que afectan directamente a la salud de las personas en las ciudades. Tal es el caso, por ejemplo, de las partículas en suspensión, las que provienen tanto de la quema de combustibles fósiles (sean usados para calefacción y/o transporte) como de la combustión de biomasa húmeda con fines de calefacción. Para el caso de Chile, un país que alberga 34 de las 46 ciudades más contaminadas por partículas en suspensión de Sudamérica [155], se torna interesante investigar, por una parte, el aporte que podría producir una alta penetración de SSFVD en la reducción de estas partículas a nivel ciudad. Y por otra, su aporte en la reducción de muertes prematuras provocadas por los altos índices de contaminación del aire en zonas urbanas. Con esto, se podría obtener un indicador de costo externo de salud (USD/kWh) basado en la alta penetración de SSFVD en las ciudades.
- **Factores e indicadores socio-económicos asociados a los SSFVD.** Para el caso de prosumidores FV residenciales, el ingreso mensual por familia es un factor clave que no está siendo considerado por las técnicas econométricas más comunes utilizadas para evaluar proyectos FV de pequeña escala. Adicionalmente, es necesario indagar sobre nuevos modelos de negocios que involucren a los ciudadanos y sobre la cantidad de empleos que se podrían crear dentro de toda la cadena de valor de los SSFVD, desde un enfoque local. Por lo tanto, se torna necesario investigar sobre la incorporación del ingreso mensual por hogar como variable dentro de las técnicas econométricas más utilizadas para el análisis de proyectos FV de pequeña escala, sobre el desarrollo de nuevos modelos de negocios participativos y, sobre la creación de empleos que generaría una implementación a gran escala de los SSFVD, por ejemplo, en una ciudad.
- **Modelado de transición energética hacia sistemas 100 % renovable desde diferentes enfoques.** Desde una perspectiva de interconexión eléctrica y acoplamiento sectorial, se torna interesante investigar sobre las diferencias que surgirían de la comparación del modelado de una transición energética para un país entre un sistema completamente interconectado (eléctricamente) y acoplado (sectorialmente), con sistemas completamente desconectados y desacoplados, así como también, una combinación de estos (totalmente interconectado pero desacoplado, y viceversa). A su vez, compararlos con el modelado de transición energética a nivel nacional, pero desde un enfoque provincia y/o municipio.

- **Barreras sociales y culturales en la implementación de tecnologías para la transición hacia sistemas energéticos 100 % renovables.** La transición energética sostenible requiere una implementación y recambio tecnológico a gran escala. En el caso de algunas tecnologías, tales como la solar FV y la eólica, dependiendo de su escala de implementación, estas pueden requerir amplias áreas de terreno y causar un impacto en el paisaje local, entre otros aspectos que afectan en la aceptabilidad de esas –y otras– tecnologías por parte de las comunidades locales. Por lo tanto, se torna necesario investigar sobre las dinámicas que existen detrás de la aceptación y rechazo de proyectos de energía renovables, considerando en el análisis patrones socio-económicos, espaciales, paisajísticos y culturales que son propios de un territorio en particular.

Referencias

- [1] Ritchie H, Roser M. CO₂ and Greenhouse Gas Emissions - Our World in Data n.d. <https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions> (accessed December 17, 2021).
- [2] Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A, Connors SL, Péan C, Berger S, et al. IPCC, 2021: Climate Change 2021: The physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 2021.
- [3] Breyer C, Heinonen S, Ruotsalainen J. New consciousness: A societal and energetic vision for rebalancing humankind within the limits of planet Earth. *Technological Forecasting and Social Change* 2017;114:7–15. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2016.06.029>.
- [4] Farfan J, Breyer C. Structural changes of global power generation capacity towards sustainability and the risk of stranded investments supported by a sustainability indicator. *Journal of Cleaner Production* 2017;141:370–84. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2016.09.068>.
- [5] Masson-Delmotte V, Zhai P, Pörtner H-O, Roberts D, Skea J, Shukla PR, et al. IPCC, 2018: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of cli. 2019.
- [6] Holden E, Linnerud K, Rygg BJ. A review of dominant sustainable energy narratives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2021;144:110955. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2021.110955>.
- [7] Ripple WJ, Wolf C, Newsome TM, Gregg JW, Lenton TM, Palomo I, et al. World Scientists' Warning of a Climate Emergency 2021. *BioScience* 2021;71:894–8. <https://doi.org/10.1093/BIOSCI/BIAB079>.
- [8] Ritchie H, Roser M. Emissions by sector - Our World in Data 2020. <https://ourworldindata.org/emissions-by-sector> (accessed June 13, 2021).
- [9] REN21. Renewables 2021 - Global Status Report. 2021.
- [10] Perez R, Perez M. A Fundamental Look At Supply Side Energy Reserves For The Planet. vol. 62. 2015.
- [11] IRENA. Global Renewables Outlook. Energy transformation 2050. Edition: 2020. 2020.
- [12] Child M, Koskinen O, Linnanen L, Breyer C. Sustainability guardrails for energy scenarios of the global energy transition. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2018;91:321–34. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.079>.
- [13] Bogdanov D, Ram M, Aghahosseini A, Gulagi A, Oyewo AS, Child M, et al. Low-cost renewable electricity as the key driver of the global energy transition towards sustainability. *Energy* 2021;227:120467. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120467>.
- [14] Hansen K, Breyer C, Lund H. Status and perspectives on 100% renewable energy systems. *Energy* 2019;175:471–80. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.03.092>.
- [15] Keiner D, Ram M, Barbosa LDSNS, Bogdanov D, Breyer C. Cost optimal self-consumption of PV prosumers with stationary batteries, heat pumps, thermal energy storage and electric vehicles across the world up to 2050. *Solar Energy* 2019;185:406–23. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.04.081>.
- [16] van Leeuwen R, de Wit JB, Smit GJM. Energy scheduling model to optimize transition routes towards 100% renewable urban districts. *International Journal of Sustainable Energy Planning and Management* 2017;13:19–46. <https://doi.org/10.5278/ijsepm.2017.13.3>.
- [17] Connolly D, Mathiesen BV. A technical and economic analysis of one potential pathway to a 100% renewable energy system. *International Journal of Sustainable Energy Planning and Management* 2014;1:7–28. <https://doi.org/10.5278/ijsepm.2014.1.2>.

- [18] Waenn A, Connolly D, Gallachóir B. Investigating 100% renewable energy supply at regional level using scenario analysis. *International Journal of Sustainable Energy Planning and Management* 2014;3:31–2. <https://doi.org/10.5278/ijsepm.2014.3.3>.
- [19] Aghahosseini A, Bogdanov D, Barbosa LSNS, Breyer C. Analysing the feasibility of powering the Americas with renewable energy and inter-regional grid interconnections by 2030. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2019;105:187–205. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.01.046>.
- [20] Bogdanov D, Farfan J, Sadovskaia K, Aghahosseini A, Child M, Gulagi A, et al. Radical transformation pathway towards sustainable electricity via evolutionary steps. *Nature Communications* 2019;1–16. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-08855-1>.
- [21] Berkhout F, Marcotullio P, Hanaoka T. Understanding energy transitions. *Sustainability Science* 2012;7:109–11. <https://doi.org/10.1007/s11625-012-0173-5>.
- [22] Breyer C, Bogdanov D, Gulagi A, Aghahosseini A, Barbosa LSNS, Koskinen O, et al. On the role of solar photovoltaics in global energy transition scenarios. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 2017;25:727–45. <https://doi.org/10.1002/pip.2885>.
- [23] Breyer C, Koskinen O, Blechinger P. Profitable climate change mitigation: The case of greenhouse gas emission reduction benefits enabled by solar photovoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2015;49:610–28. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.061>.
- [24] Breyer C, Bogdanov D, Aghahosseini A, Gulagi A, Child M, Oyewo AS, et al. Solar photovoltaics demand for the global energy transition in the power sector. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 2018;26:505–23. <https://doi.org/10.1002/pip.2950>.
- [25] Breyer C, Khalili S, Bogdanov D. Solar photovoltaic capacity demand for a sustainable transport sector to fulfil the Paris Agreement by 2050. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 2019;27:978–89. <https://doi.org/10.1002/pip.3114>.
- [26] Laine HS, Salpakari J, Looney EE, Savin H, Peters IM, Buonassisi T. Meeting global cooling demand with photovoltaics during the 21st century. *Energy and Environmental Science* 2019;12:2706–16. <https://doi.org/10.1039/c9ee00002j>.
- [27] IEA-PVPS. Snapshot of Global PV Markets - 2021. IEA PVPS. 2021.
- [28] Haegel NM, Atwater H, Barnes T, Breyer C, Burrell A, Chiang Y-M, et al. Terawatt-scale photovoltaics: Transform global energy. *Science* 2019;364:836–8. <https://doi.org/10.1126/science.aaw1845>.
- [29] IRENA. Renewable Energy and Jobs – Annual Review 2020. 2020.
- [30] Victoria M, Haegel N, Peters IM, Sinton R, Jäger-Waldau A, del Cañizo C, et al. Solar photovoltaics is ready to power a sustainable future. *Joule* 2021;0. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2021.03.005>.
- [31] Creutzig F, Agoston P, Goldschmidt JC, Luderer G, Nemet G, Pietzcker RC. The underestimated potential of solar energy to mitigate climate change. *Nature Energy* 2017;2:1–9. <https://doi.org/10.1038/nenergy.2017.140>.
- [32] Ram M, Bogdanov D, Aghahosseini A, Oyewo S, Gulagi A, Child M, et al. Global Energy System based on 100% Renewable Energy: Power, Heat, Transport and Desalination Sectors. 2019.
- [33] IEA. WORLD ENERGY OUTLOOK 2019. 2019.
- [34] REN21. Renewables in Cities 2021 – Global Status Report. 2021.
- [35] IQAir. World Air Quality Report. 2019.
- [36] Couture T, Barbose G, Jacobs D, Parkinson G, Chessin E, Belden A, et al. Residential Prosumers: Drivers and Policy Options (Re-Prosumers). 2014. <https://doi.org/10.2172/1163237>.
- [37] Parag Y, Sovacool BK. Electricity market design for the prosumer era. *Nature Energy* 2016;1:16032. <https://doi.org/10.1038/nenergy.2016.32>.

- [38] Espinoza R, Muñoz-Cerón E, Aguilera J, de la Casa J. Feasibility evaluation of residential photovoltaic self-consumption projects in Peru. *Renewable Energy* 2019;136:414–27. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.01.003>.
- [39] Jacobson MZ, Delucchi MA, Cameron MA, Mathiesen B v. Matching demand with supply at low cost in 139 countries among 20 world regions with 100% intermittent wind, water, and sunlight (WWS) for all purposes. *Renewable Energy* 2018;123:236–48. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.02.009>.
- [40] Teske S, Nagrath K, Morris T, Dooley K. Achieving the Paris Climate Agreement Goals: Global and Regional 100% Renewable Energy Scenarios with Non-energy GHG Pathways for +1.5°C and +2°C. 2019. https://doi.org/10.1007/978-3-030-05843-2_7.
- [41] Steffen W, Richardson K, Rockström J, Cornell SE, Fetzer I, Bennett EM, et al. Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science* 2015;347:1259855–1259855. <https://doi.org/10.1126/science.1259855>.
- [42] Ripple WJ, Wolf C, Newsome TM, Galetti M, Alamgir M, Crist E, et al. World scientists' warning to humanity: A second notice. *BioScience* 2017;67:1026–8. <https://doi.org/10.1093/biosci/bix125>.
- [43] Newbold T. Future effects of climate and land-use change on terrestrial vertebrate community diversity under different scenarios. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 285, Royal Society Publishing; 2018, p. 20180792. <https://doi.org/10.1098/rspb.2018.0792>.
- [44] Warren R, Price J, Graham E, Forstenhaeusler N, VanDerWal J. The projected effect on insects, vertebrates, and plants of limiting global warming to 1.5°C rather than 2°C. *Science* 2018;360:791–5. <https://doi.org/10.1126/science.aar3646>.
- [45] Nolan C, Overpeck JT, Allen JRM, Anderson PM, Betancourt JL, Binney HA, et al. Past and future global transformation of terrestrial ecosystems under climate change. *Science* 2018;361:920–3. <https://doi.org/10.1126/science.aan5360>.
- [46] Hagedorn G, Loew T, Seneviratne SI, Lucht W, Beck ML, Hesse J, et al. The concerns of the young protesters are justified: A statement by Scientists for Future concerning the protests for more climate protection. *GAIA* 2019;28:79–87. <https://doi.org/10.14512/gaia.28.2.3>.
- [47] Hagedorn G, Kalmus P, Mann M, Vicca S, van den Berge J, van Ypersele JP, et al. Concerns of young protesters are justified. *Science* 2019;364:139–40. <https://doi.org/10.1126/science.aax3807>.
- [48] Hoegh-Guldberg O, Jacob D, Taylor M, Guillén Bolaños T, Bindi M, Brown S, et al. The human imperative of stabilizing global climate change at 1.5°C. *Science* 2019;365. <https://doi.org/10.1126/science.aaw6974>.
- [49] Trisos CH, Merow C, Pigot AL. The projected timing of abrupt ecological disruption from climate change. *Nature* 2020;580:496–501. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2189-9>.
- [50] Baisero D, Visconti P, Pacifici M, Cimatti M, Rondinini C. Projected Global Loss of Mammal Habitat Due to Land-Use and Climate Change. *One Earth* 2020;2:578–85. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.05.015>.
- [51] AWS. Journal Articles Related to Scientists Warning. Alliance of World Scientists 2020. <https://scientistswarning.forestry.oregonstate.edu/journal-articles-related-scientists-warning> (accessed August 17, 2020).
- [52] Muntean M, Guizzardi D, Schaaf E, Crippa M, Solazzo E, Olivier JGJ, et al. Fossil CO2 emissions of all world countries: 2018 report. 2018. <https://doi.org/10.2760/30158>.
- [53] Davis SJ, Caldeira K, Matthews HD. Future CO2 emissions and climate change from existing energy infrastructure. *Science* 2010;329:1330–3. <https://doi.org/10.1126/science.1188566>.
- [54] Rogelj J, Luderer G, Pietzcker RC, Kriegler E, Schaeffer M, Krey V, et al. Energy system transformations for limiting end-of-century warming to below 1.5 °C. *Nature Climate Change* 2015;5:519–27. <https://doi.org/10.1038/nclimate2572>.

- [55] Rogelj J, Popp A, Calvin K v., Luderer G, Emmerling J, Gernaat D, et al. Scenarios towards limiting global mean temperature increase below 1.5 °c. *Nature Climate Change* 2018;8:325–32. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0091-3>.
- [56] Davis SJ, Lewis NS, Shaner M, Aggarwal S, Arent D, Azevedo IL, et al. Net-zero emissions energy systems. *Science* 2018;360. <https://doi.org/10.1126/science.aas9793>.
- [57] Overpeck JT, Conde C. A call to climate action. *Science* 2019;364:807. <https://doi.org/10.1126/science.aay1525>.
- [58] SEI, IISD, ODI, Climate Analytics, CICERO, UNEP. The production gap report 2019. vol. 24. 2019. <https://doi.org/10.1049/ep.1978.0323>.
- [59] Farrow, A., Miller, K.A. & Myllyvirta L. Toxic Air: The Price of Fossil Fuels. 2020.
- [60] Lohrmann A, Farfan J, Caldera U, Lohrmann C, Breyer C. Global scenarios for significant water use reduction in thermal power plants based on cooling water demand estimation using satellite imagery. *Nature Energy* 2019;4:1040–8. <https://doi.org/10.1038/s41560-019-0501-4>.
- [61] Farfan J, Lohrmann A, Breyer C. Integration of greenhouse agriculture to the energy infrastructure as an alimentary solution. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2019;110:368–77. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.084>.
- [62] Steffen W, Rockström J, Richardson K, Lenton TM, Folke C, Liverman D, et al. Trajectories of the Earth System in the Anthropocene. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 2018;115:8252–9. <https://doi.org/10.1073/pnas.1810141115>.
- [63] Chapron G, Epstein Y, Lopez-Bao JV. Natural Systems From Destruction. *Science* 2019;363:1392–3.
- [64] Ellis BEC. Sharing the land between nature and people. *Science* 2019;364:1226–8.
- [65] Díaz S, Settele J, Brondizio ES, Ngo HT, Agard J, Arneeth A, et al. Pervasive human-driven decline of life on Earth points to the need for transformative change. *Science* 2019;366. <https://doi.org/10.1126/science.aax3100>.
- [66] United Nations Environment Programme. Emissions Gap Report 2019. 2019.
- [67] Eskander SMSU, Fankhauser S. Reduction in greenhouse gas emissions from national climate legislation. *Nature Climate Change* 2020;10:750–6. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0831-z>.
- [68] Grim RG, Huang Z, Guarnieri MT, Ferrell JR, Tao L, Schaidle JA. Transforming the carbon economy: Challenges and opportunities in the convergence of low-cost electricity and reductive CO₂ utilization. *Energy and Environmental Science* 2020;13:472–94. <https://doi.org/10.1039/c9ee02410g>.
- [69] Floyd J, Alexander S, Lenzen M, Moriarty P, Palmer G, Chandra-Shekeran S, et al. Energy descent as a post-carbon transition scenario: How ‘knowledge humility’ reshapes energy futures for post-normal times. *Futures* 2020;122:102565. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2020.102565>.
- [70] Luderer G, Pehl M, Arvesen A, Gibon T, Bodirsky BL, de Boer HS, et al. Environmental co-benefits and adverse side-effects of alternative power sector decarbonization strategies. *Nature Communications* 2019;10:1–13. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-13067-8>.
- [71] Donges JF, Winkelmann R, Lucht W, Cornell SE, Dyke JG, Rockström J, et al. Closing the loop: Reconnecting human dynamics to Earth System science. *Anthropocene Review* 2017;4:151–7. <https://doi.org/10.1177/2053019617725537>.
- [72] Gielen D, Boshell F, Saygin D, Bazilian MD, Wagner N, Gorini R. The role of renewable energy in the global energy transformation. *Energy Strategy Reviews* 2019;24:38–50. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.01.006>.
- [73] Wei YM, Han R, Wang C, Yu B, Liang QM, Yuan XC, et al. Self-preservation strategy for approaching global warming targets in the post-Paris Agreement era. *Nature Communications* 2020;11:1–13. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15453-z>.
- [74] REN21. Renewables 2020 Global Status Report. 2020.
- [75] IEA. Tracking Energy Integration – Analysis - IEA. 2020.

- [76] IEA. Energy Efficiency 2020. 2020.
- [77] G20. G20 Energy Efficiency Leading Programme. 2016.
- [78] Bogdanov D, Toktarova A, Breyer C. Transition towards 100% renewable power and heat supply for energy intensive economies and severe continental climate conditions: Case for Kazakhstan. *Applied Energy* 2019;253:113606. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113606>.
- [79] Khalili S, Rantanen E, Bogdanov D, Breyer C. Global transportation demand development with impacts on the energy demand and greenhouse gas emissions in a climate-constrained world. *Energies* 2019;12:3870. <https://doi.org/10.3390/en12203870>.
- [80] Ram M, Galimova T, Bogdanov D, Fasihi M, Gulagi A, Breyer dena C, et al. Powerfuels in a Renewable Energy World. 2020.
- [81] Soutar I, Mitchell C. Towards pragmatic narratives of societal engagement in the UK energy system. *Energy Research and Social Science* 2018;35:132–9. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2017.10.041>.
- [82] Ritzer G, Jurgenson N. Production, Consumption, Prosumption: The nature of capitalism in the age of the digital “prosumer.” *Journal of Consumer Culture* 2010;10:13–36. <https://doi.org/10.1177/1469540509354673>.
- [83] Ritzer G. Prosumption: Evolution, revolution, or eternal return of the same? *Journal of Consumer Culture* 2014;14:3–24. <https://doi.org/10.1177/1469540513509641>.
- [84] Ruotsalainen J, Karjalainen J, Child M, Heinonen S. Culture, values, lifestyles, and power in energy futures: A critical peer-to-peer vision for renewable energy. *Energy Research and Social Science* 2017;34:231–9. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2017.08.001>.
- [85] Weitemeyer S, Kleinhans D, Vogt T, Agert C. Integration of Renewable Energy Sources in future power systems: The role of storage. *Renewable Energy* 2015;75:14–20. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.09.028>.
- [86] Cebulla F, Haas J, Eichman J, Nowak W, Mancarella P. How much electrical energy storage do we need? A synthesis for the U.S., Europe, and Germany. *Journal of Cleaner Production* 2018;181:449–59. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.144>.
- [87] Child M, Kemfert C, Bogdanov D, Breyer C. Flexible electricity generation, grid exchange and storage for the transition to a 100% renewable energy system in Europe. *Renewable Energy* 2019;139:80–101. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.02.077>.
- [88] IRENA. ELECTRICITY STORAGE AND RENEWABLES: COSTS AND MARKETS TO 2030. 2017.
- [89] Brown T, Schlachtberger D, Kies A, Schramm S, Greiner M. Synergies of sector coupling and transmission reinforcement in a cost-optimised, highly renewable European energy system. *Energy* 2018;160:720–39. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.06.222>.
- [90] Nielsen TB, Lund H, Østergaard PA, Duic N, Mathiesen BV. Perspectives on energy efficiency and smart energy systems from the 5th SESAAU2019 conference. *Energy* 2021;216:119260. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119260>.
- [91] Ambaye TG, Vaccari M, Bonilla-Petriciolet A, Prasad S, van Hullebusch ED, Rtimi S. Emerging technologies for biofuel production: A critical review on recent progress, challenges and perspectives. *Journal of Environmental Management* 2021;290:112627. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112627>.
- [92] Amine K. E-fuel system: a conceptual breakthrough for energy storage. *Science Bulletin* 2019;64:227–8. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2019.01.020>.
- [93] Lips D, Schuurmans JM, Branco Dos Santos F, Hellingwerf KJ. Many ways towards “solar fuel”: Quantitative analysis of the most promising strategies and the main challenges during scale-up. *Energy and Environmental Science* 2018;11:10–22. <https://doi.org/10.1039/c7ee02212c>.

- [94] Detz RJ, Reek JNH, van der Zwaan BCC. The future of solar fuels: When could they become competitive? *Energy and Environmental Science* 2018;11:1653–69. <https://doi.org/10.1039/c8ee00111a>.
- [95] Ram M, Bogdanov D, Aghahosseini A, Mensah T, Breyer C, Schmela M, et al. 100% Renewable Europe: How to make Europe's energy system climate-neutral before 2050. 2020.
- [96] Global100REStrategyGroup. Join declaration of the global 100% renewable energy strategy group 2021. <https://global100restrategygroup.org/> (accessed June 14, 2021).
- [97] Brown TW, Bischof-Niemz T, Blok K, Breyer C, Lund H, Mathiesen B v. Response to 'Burden of proof: A comprehensive review of the feasibility of 100% renewable-electricity systems.' *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2018;92:834–47. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.113>.
- [98] Aghahosseini A, Bogdanov D, Ghorbani N, Breyer C. Analysis of 100% renewable energy for Iran in 2030: integrating solar PV, wind energy and storage. *International Journal of Environmental Science and Technology* 2018;15:17–36. <https://doi.org/10.1007/s13762-017-1373-4>.
- [99] Aghahosseini A, Bogdanov D, Breyer C. Towards sustainable development in the MENA region: Analysing the feasibility of a 100% renewable electricity system in 2030. *Energy Strategy Reviews* 2020;28:100466. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2020.100466>.
- [100] Hooker-Stroud A, James P, Kellner T, Allen P. Toward understanding the challenges and opportunities in managing hourly variability in a 100% renewable energy system for the UK. *Carbon Management* 2014;5:373–84. <https://doi.org/10.1080/17583004.2015.1024955>.
- [101] Jacobson MZ, Delucchi MA, Bazouin G, Bauer ZAF, Heavey CC, Fisher E, et al. 100% clean and renewable wind, water, and sunlight (WWS) all-sector energy roadmaps for the 50 United States. *Energy and Environmental Science* 2015;8:2093–117. <https://doi.org/10.1039/c5ee01283j>.
- [102] Child M, Breyer C. Vision and initial feasibility analysis of a recarbonised Finnish energy system for 2050. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2016;66:517–36. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.07.001>.
- [103] Hansen K, Mathiesen BV, Skov IR. Full energy system transition towards 100% renewable energy in Germany in 2050. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2019;102:1–13. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.11.038>.
- [104] Algunaibet IM, Pozo C, Galán-Martín Á, Huijbregts MAJ, mac Dowell N, Guillén-Gosálbez G. Powering sustainable development within planetary boundaries. *Energy and Environmental Science* 2019;12:1890–900. <https://doi.org/10.1039/c8ee03423k>.
- [105] Capellán-Pérez I, de Blas I, Nieto J, de Castro C, Miguel LJ, Carpintero Ó, et al. MEDEAS: A new modeling framework integrating global biophysical and socioeconomic constraints. *Energy and Environmental Science* 2020;13:986–1017. <https://doi.org/10.1039/c9ee02627d>.
- [106] Debnath KB, Mourshed M. Challenges and gaps for energy planning models in the developing-world context. *Nature Energy* 2018;3:172–84. <https://doi.org/10.1038/s41560-018-0095-2>.
- [107] Victoria M, Zhu K, Brown T, Andresen GB, Greiner M. Early decarbonisation of the European energy system pays off. *Nature Communications* 2020;11:1–9. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-20015-4>.
- [108] Bogdanov D, Gulagi A, Fasihi M, Breyer C. Full energy sector transition towards 100% renewable energy supply: Integrating power, heat, transport and industry sectors including desalination. *Applied Energy* 2021;283:116273. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116273>.
- [109] Satymov R, Bogdanov D, Breyer C. The Value of Fast Transitioning to a Fully Sustainable Energy System: The Case of Turkmenistan. *IEEE Access* 2021;9:13590–611. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3050817>.

- [110] Azzuni A, Aghahosseini A, Ram M, Bogdanov D, Caldera U, Breyer C. Energy security analysis for a 100% renewable energy transition in Jordan by 2050. *Sustainability* (Switzerland) 2020;12:4921. <https://doi.org/10.3390/SU12124921>.
- [111] Oyewo AS, Solomon AA, Bogdanov D, Aghahosseini Arman, Mensah TNO, Ram M, et al. Just transition towards defossilised energy systems for developing economies: A case study of Ethiopia. *Renewable Energy*, in Press 2021.
- [112] Lawrenz L, Xiong B, Lorenz L, Krumm A, Hosenfeld H, Burandt T, et al. Exploring energy pathways for the low-carbon transformation in India—a model-based analysis. *Energies* 2018;11:3001. <https://doi.org/10.3390/en11113001>.
- [113] Gulagi A, Pathak S, Bogdanov D, Breyer C. Renewable energy transition for the Himalayan countries Nepal and Bhutan: Pathways towards reliable, affordable and sustainable energy for all. Submitted 2021.
- [114] Gulagi A, Alcanzare M, Bogdanov D, Esparcia E, Ocon J, Breyer C. Transition pathway towards 100% renewable energy across the sectors of power, heat, transport, and desalination for the Philippines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2021;144:110934. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110934>.
- [115] Aboumahboub T, Brecha R, Bir Shrestha H, Fuentes Hutfilter U, Geiges A, Hare W, et al. Cost-optimal configuration of a renewable-based Australian power system. *Renewable Energy and Power Quality Journal* 2020. <https://doi.org/10.24084/repqj18.482>.
- [116] Aboumahboub T, Brecha RJ, Shrestha HB, Fuentes U, Geiges A, Hare W, et al. Decarbonization of Australia s energy system: Integrated modeling of the transformation of electricity, transportation, and industrial sectors. *Energies* 2020;13:3805. <https://doi.org/10.3390/en13153805>.
- [117] Sarmiento L, Burandt T, Löffler K, Oei PY. Analyzing scenarios for the integration of renewable energy sources in the Mexican energy system—an application of the Global Energy System Model (GENeSys-MOD). *Energies* 2019;12:3270. <https://doi.org/10.3390/en12173270>.
- [118] Buira D, Tovilla J, Farbes J, Jones R, Haley B, Gastelum D. A whole-economy Deep Decarbonization Pathway for Mexico. *Energy Strategy Reviews* 2021;33:100578. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2020.100578>.
- [119] Lopez G, Aghahosseini A, Bogdanov D, Mensah TNO, Ghorbani N, Caldera U, et al. Pathway to a fully sustainable energy system for Bolivia across power, heat, and transport sectors by 2050. *Journal of Cleaner Production* 2021;293:126195. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126195>.
- [120] IRENA. Planning for the Renewable Future: Long-term modelling and tools to expand variable renewable power in emerging economies. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi: 2017.
- [121] IEA. Distributed Solar PV – Renewables 2019 – Analysis - IEA. International Energy Agency 2019. <https://www.iea.org/reports/renewables-2019/distributed-solar-pv> (accessed July 10, 2020).
- [122] Xiao M, Junne T, Haas J, Klein M. Plummeting costs of renewables - Are energy scenarios lagging? *Energy Strategy Reviews* 2021;35:100636. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2021.100636>.
- [123] Jaxa-Rozen M, Trutnevyte E. Sources of uncertainty in long-term global scenarios of solar photovoltaic technology. *Nature Climate Change* 2021;11:266–73. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-00998-8>.
- [124] Breyer C. A global overview of future energy. *Future Energy: Improved, Sustainable and Clean Options for Our Planet*, Elsevier; 2020, p. 727–56. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102886-5.00034-7>.
- [125] REN21. Renewables in Cities 2019 Global Status Report. 2019.

- [126] Billi M, Blanco G, Urquiza A. What is the ‘Social’ in Climate Change Research? A Case Study on Scientific Representations from Chile. *Minerva* 2019;57:293–315. <https://doi.org/10.1007/s11024-019-09369-2>.
- [127] Aguirre C, García-Loyola S, Testa G, Silva Di, Farías L. Insight into anthropogenic forcing on coastal upwelling off south-central Chile. *Elementa* 2018;6. <https://doi.org/10.1525/elementa.314>.
- [128] Arriagada R, Aldunce P, Blanco G, Ibarra C, Moraga P, Nahuelhual L, et al. Climate change governance in the anthropocene: Emergence of polycentrism in Chile. *Elementa* 2018;6:68. <https://doi.org/10.1525/elementa.329>.
- [129] Boisier JP, Alvarez-Garreton C, Cordero RR, Damiani A, Gallardo L, Garreaud RD, et al. Anthropogenic drying in central-southern Chile evidenced by long-term observations and climate model simulations. *Elementa* 2018;6:74. <https://doi.org/10.1525/elementa.328>.
- [130] Gayo EM, McRostie VB, Campbell R, Flores C, Maldonado A, Uribe-Rodriguez M, et al. Geohistorical records of the Anthropocene in Chile. *Elementa* 2019;7. <https://doi.org/10.1525/elementa.353>.
- [131] Barriá P, Rojas M, Moraga P, Muñoz A, Bozkurt D, Alvarez-Garreton C. Anthropocene and streamflow: Long-term perspective of streamflow variability and water rights. *Elementa* 2019;7:2. <https://doi.org/10.1525/elementa.340>.
- [132] Bauer C, Correa C, Gallardo L, González G, Guridi R, Latorre C, et al. The Anthropocene in Chile. Toward a New Pact of Coexistence. vol. 11. 2019. <https://doi.org/10.1215/22011919-7754578>.
- [133] CNE. Balance nacional de energía – Energía Abierta | Comisión Nacional de Energía 2020. <http://energiaabierta.cl/visualizaciones/balance-de-energia/> (accessed June 15, 2021).
- [134] ME. Carbono neutralidad en el sector energía: Proyección de consumo energético nacional – Ministeriol de Energía. 2020.
- [135] CAT. Chile| Climate Action Tracker. Climate Action Tracker 2019. <https://climateactiontracker.org/countries/chile/> (accessed July 2, 2020).
- [136] Climate Action Tracker. Chile’s proposed NDC update October 2019 2020. <https://climateactiontracker.org/climate-target-update-tracker/chile-ndc-proposal-2019-10-16/> (accessed June 30, 2020).
- [137] Durán AP, Barbosa O. Seeing Chile’s forest for the tree plantations. *Science* 2019;365:1388. <https://doi.org/10.1126/science.aaz2170>.
- [138] Heilmayr R, Echeverría C, Lambin EF. Impacts of Chilean forest subsidies on forest cover, carbon and biodiversity. *Nature Sustainability* 2020:1–9. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0547-0>.
- [139] Palma Behnke R, Barriá C, Basoa K, Benavente D, Benavides C, Campos B, et al. Chilean NDC mitigation proposal : Methodological approach and supporting ambition. 2019.
- [140] ChileSustentable. PLAN FOR DECARBONISATION AND CLOSURE OF COAL- FIRED POWER PLANTS IN CHILE. 2019.
- [141] MMA, GIZ. Chile’s Green Tax. 2018.
- [142] PVmagazine. Acera, en Chile, solicita modificar el impuesto verde – pv magazine Latin America. PV Magazine Latino América 2019. <https://www.pv-magazine-latam.com/2019/06/18/acera-en-chile-solicita-modificar-el-impuesto-verde/> (accessed August 17, 2020).
- [143] Gob.cl - Article: Chile Announces Dates Of The Most Important Climate Change Summit In The World n.d. <https://www.gob.cl/en/news/chile-announces-dates-most-important-climate-change-summit-world/> (accessed June 30, 2020).
- [144] Bustos S, Gallardo L, Garreaud R, Tondreau N. The 2010-2015 mega-drought: A lesson for the future. 2015.
- [145] Garreaud RD, Alvarez-Garreton C, Barichivich J, Pablo Boisier J, Christie D, Galleguillos M, et al. The 2010-2015 megadrought in central Chile: Impacts on regional hydroclimate and

- vegetation. *Hydrology and Earth System Sciences* 2017;21:6307–27. <https://doi.org/10.5194/hess-21-6307-2017>.
- [146] Garreaud RD, Boisier JP, Rondanelli R, Montecinos A, Sepúlveda HH, Veloso-Aguila D. The Central Chile Mega Drought (2010–2018): A climate dynamics perspective. *International Journal of Climatology* 2020;40:421–39. <https://doi.org/10.1002/joc.6219>.
- [147] Muñoz AA, Klock-Barría K, Alvarez-Garreton C, Aguilera-Betti I, González-Reyes Á, Lastra JA, et al. Water crisis in petorca basin, Chile: The combined effects of a mega-drought and water management. *Water (Switzerland)* 2020;12. <https://doi.org/10.3390/w12030648>.
- [148] Vargas CA, Garreaud R, Barra R, Vásquez-Lavin F, Saldías GS, Parra O. Environmental costs of water transfers. *Nature Sustainability* 2020;3:408–9. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0526-5>.
- [149] Statista. Global copper production (by country) 2010-2018 n.d. <https://www.statista.com/statistics/264626/copper-production-by-country/> (accessed June 30, 2020).
- [150] Nasirov S, Agostini CA. Mining experts' perspectives on the determinants of solar technologies adoption in the Chilean mining industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2018;95:194–202. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.07.038>.
- [151] Deetman S, Pauliuk S, van Vuuren DP, van der Voet E, Tukker A. Scenarios for Demand Growth of Metals in Electricity Generation Technologies, Cars, and Electronic Appliances. *Environmental Science and Technology* 2018;52:4950–9. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b05549>.
- [152] Valero A, Valero A, Calvo G, Ortego A, Ascaso S, Palacios JL. Global material requirements for the energy transition. An exergy flow analysis of decarbonisation pathways. *Energy* 2018;159:1175–84. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.06.149>.
- [153] Valero A, Valero A, Calvo G, Ortego A. Material bottlenecks in the future development of green technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2018;93:178–200. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.041>.
- [154] PV-magazine. The weekend read: Chile taps 'white gold' for security of energy supply – pv magazine International n.d. <https://www.pv-magazine.com/2019/08/31/the-weekend-read-chile-taps-white-gold-for-security-of-energy-supply/> (accessed June 30, 2020).
- [155] TeleSur. Chile's Cities Are the Most Air-Polluted South American Cities | News | teleSUR English. TeleSur News 2019. <https://www.telesurenglish.net/news/Chiles-Cities-Are-the-Most-Air-Polluted-South-American-Cities-20190306-0021.html> (accessed June 30, 2020).
- [156] Jorquera H, Barraza F, Heyer J, Valdivia G, Schiappacasse LN, Montoya LD. Indoor PM_{2.5} in an urban zone with heavy wood smoke pollution: The case of Temuco, Chile. *Environmental Pollution* 2018;236:477–87. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.01.085>.
- [157] Mazzeo A, Huneus N, Ordoñez C, Orfanos-Cheuquela A, Menut L, Mailler S, et al. Impact of residential combustion and transport emissions on air pollution in Santiago during winter. *Atmospheric Environment* 2018;190:195–208. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.06.043>.
- [158] Toro A R, Kvakić M, Klaić ZB, Koračin D, Morales S RGE, Leiva G MA. Exploring atmospheric stagnation during a severe particulate matter air pollution episode over complex terrain in Santiago, Chile. *Environmental Pollution* 2019;244:705–14. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.10.067>.
- [159] Trehwela B, Huneus N, Munizaga M, Mazzeo A, Menut L, Mailler S, et al. Analysis of exposure to fine particulate matter using passive data from public transport. *Atmospheric Environment* 2019;215:116878. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.116878>.
- [160] Lapere R, Menut L, Mailler S, Huneus N. Soccer games and record-breaking PM_{2.5} pollution events in Santiago, Chile. *Atmospheric Chemistry and Physics* 2020;20:4681–94. <https://doi.org/10.5194/acp-20-4681-2020>.

- [161] IQAir. World's Most Polluted Cities in 2018 - PM2.5 Ranking | AirVisual. World Air Quality Report 2019 2019. <https://www.iqair.com/world-most-polluted-cities> (accessed August 26, 2020).
- [162] Reyes R, Schueftan A, Ruiz C, González AD. Controlling air pollution in a context of high energy poverty levels in southern Chile: Clean air but colder houses? *Energy Policy* 2019;124:301–11. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.10.022>.
- [163] Seguel RJ, Gallardo L, Fleming ZL, Landeros S. Two decades of ozone standard exceedances in Santiago de Chile. *Air Quality, Atmosphere and Health* 2020;13:593–605. <https://doi.org/10.1007/s11869-020-00822-w>.
- [164] BloombergNEF. Emerging Markets Outlook 2019. Energy transition in the world's fastest growing economies. 2019. <https://doi.org/10.1145/2133806.2133815>.
- [165] CNE. Reporte Mensual ERNC - Enero 2021 Vol. N°23. 2021.
- [166] Simsek Y, Lorca Á, Urmee T, Bahri PA, Escobar R. Review and assessment of energy policy developments in Chile. *Energy Policy* 2019;127:87–101. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.11.058>.
- [167] CNE. Reporte Mensual Sector Energético - Enero 2021 Vol. 71. 2021.
- [168] [MMA] - Ministerio de Medio Ambiente. Informe del Inventario Nacional de Chile 2020: Inventario nacional de gases de efecto invernadero y otros contaminantes climáticos 1990-2018. 2020.
- [169] Furnaro A. Neoliberal energy transitions: The renewable energy boom in the Chilean mining economy. *Environment and Planning E: Nature and Space* 2019;251484861987468. <https://doi.org/10.1177/2514848619874685>.
- [170] Flores-Fernández C. The Chilean energy “transition”: between successful policy and the assimilation of a post-political energy condition. *Innovation: The European Journal of Social Science Research* 2020;33:173–93. <https://doi.org/10.1080/13511610.2020.1749836>.
- [171] ME. Planificación Energética de Largo Plazo: Proyectando juntos el futuro energético de Chile. 2020.
- [172] Rondanelli R, Molina A, Falvey M. The Atacama surface solar maximum. *Bulletin of the American Meteorological Society* 2015;96:405–18. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-13-00175.1>.
- [173] Lu X, McElroy MB, Kiviluoma J. Global potential for wind-generated electricity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 106, National Academy of Sciences; 2009, p. 10933–8. <https://doi.org/10.1073/pnas.0904101106>.
- [174] Ramírez-Sagner G, Mata-Torres C, Pino A, Escobar RA. Economic feasibility of residential and commercial PV technology: The Chilean case. *Renewable Energy* 2017;111:332–43. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.04.011>.
- [175] Haas J, Palma-Behnke R, Valencia F, Araya P, Díaz-Ferrán G, Telsnig T, et al. Sunset or sunrise? Understanding the barriers and options for the massive deployment of solar technologies in Chile. *Energy Policy* 2018;112:399–414. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.10.001>.
- [176] Fasihi M, Bogdanov D, Breyer C. Techno-Economic Assessment of Power-to-Liquids (PtL) Fuels Production and Global Trading Based on Hybrid PV-Wind Power Plants. *Energy Procedia*, vol. 99, Elsevier Ltd; 2016, p. 243–68. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.10.115>.
- [177] Fasihi M, Breyer C. Synthetic Methanol and Dimethyl Ether Production based on Hybrid PV-Wind Power Plants. 11th International Renewable Energy Storage, 2017, p. 1–6.
- [178] Fasihi M, Breyer C. Baseload electricity and hydrogen supply based on hybrid PV-wind power plants. *Journal of Cleaner Production* 2020;243:118466. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118466>.

- [179] Fasihi M, Weiss R, Savolainen J, Breyer C. Global potential of green ammonia based on hybrid PV-wind power plants. *Applied Energy* 2021;116170. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116170>.
- [180] Armijo J, Philibert C. Flexible production of green hydrogen and ammonia from variable solar and wind energy: Case study of Chile and Argentina. *International Journal of Hydrogen Energy* 2020;45:1541–58. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.11.028>.
- [181] Schmidt J, Gruber K, Klingler M, Klöckl C, Ramirez Camargo L, Regner P, et al. A new perspective on global renewable energy systems: Why trade in energy carriers matters. *Energy and Environmental Science* 2019;12:2022–9. <https://doi.org/10.1039/c9ee00223e>.
- [182] Munoz FD, Pumarino BJ, Salas IA. Aiming low and achieving it: A long-term analysis of a renewable policy in Chile. *Energy Economics* 2017;65:304–14. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2017.05.013>.
- [183] Raugei M, Leccisi E, Fthenakis V, Escobar Moragas R, Simsek Y. Net energy analysis and life cycle energy assessment of electricity supply in Chile: Present status and future scenarios. *Energy* 2018;162:659–68. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.08.051>.
- [184] Maximov SA, Harrison GP, Friedrich D. Long term impact of grid level energy storage on renewable energy penetration and emissions in the Chilean electric system. *Energies* 2019;12:1070. <https://doi.org/10.3390/en12061070>.
- [185] Paardekooper S, Lund H, Chang M, Nielsen S, Moreno D, Thellufsen JZ. Heat Roadmap Chile: A national district heating plan for air pollution decontamination and decarbonisation. *Journal of Cleaner Production* 2020;272:122744. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122744>.
- [186] Haas J, Cebulla F, Nowak W, Rahmann C, Palma-Behnke R. A multi-service approach for planning the optimal mix of energy storage technologies in a fully-renewable power supply. *Energy Conversion and Management* 2018;178:355–68. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.09.087>.
- [187] Haas J, Nowak W, Palma-Behnke R. Multi-objective planning of energy storage technologies for a fully renewable system: Implications for the main stakeholders in Chile. *Energy Policy* 2019;126:494–506. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.11.034>.
- [188] Gaete-Morales C, Gallego-Schmid A, Stamford L, Azapagic A. A novel framework for development and optimisation of future electricity scenarios with high penetration of renewables and storage. *Applied Energy* 2019;250:1657–72. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.05.006>.
- [189] INE. WEB DISEMINACIÓN CENSO 2017 WEB DISEMINACIÓN CENSO 2017. Resultados CENSO 2017 Por País, Regiones y Comunes 2017. <http://resultados.censo2017.cl/> (accessed June 27, 2020).
- [190] GORE, CEPAL. Estrategia Regional de Desarrollo de Aysén. 2009.
- [191] Osorio-Aravena JC. Sistemas aislados. Una mirada descriptiva de las experiencias en la región de Aysén. In: Baigorrotegui G, Parker C, editors. *¿Conectar o desconectar? Comunidades Energéticas y transiciones hacia la sustentabilidad*, Santiago, Chile: Colección Idea; 2018, p. 127–55.
- [192] Segura-Ortiz P, Baigorrotegui G. Ciudadanía y comunidades de Aysén en la continua defensa por preservar su reserva de vida. In: Baigorrotegui G, Parker C, editors. *¿Conectar o Desconectar? Comunidades Energéticas y transiciones hacia la sustentabilidad*, Colección Idea; 2018, p. 47–64.
- [193] ME. Política Energética Región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo. Ministerio de Energía del Gobierno de Chile; 2018.
- [194] CCARV. Propuesta ciudadana de política energética para Aysén reserva de vida. Coalición ciudadana por Aysén reserva de vida; 2018.
- [195] CNE. Anuario estadístico de energía 2019. 2020.

- [196] Huneeus N, Urquiza A, Gayó E, Osses M, Arriagada R, Valdés M, et al. El aire que respiramos: pasado, presente y futuro – Contaminación atmosférica por MP2,5 en el centro y sur de Chile. Santiago: 2020.
- [197] CNE. Región Aysén del Gral. Carlos Ibáñez del Campo - Energía Región. Comisión Nacional de Energía n.d. <https://energiaregion.cl/region/AYSEN> (accessed December 17, 2021).
- [198] Electricidad. En Coyhaique se construye la central fotovoltaica más austral de América n.d. <https://www.revistaei.cl/2021/04/30/en-coyhauque-se-construye-la-central-fotovoltaica-mas-austral-de-america/#> (accessed June 16, 2021).
- [199] CNE. Capacidad Instalada de Generación - SEN · Comision Nacional de Energia n.d. <http://datos.energiaabierta.cl/dataviews/245691/CAPAC-INSTA-DE-GENER-SEN/> (accessed June 16, 2021).
- [200] BCN. LEY-20571 - MINISTERIO DE ENERGÍA. Biblioteca Del Congreso Nacional Del Gobierno de Chile 2012. <https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=1038211> (accessed July 10, 2020).
- [201] ME. Proceso de planificación energética de largo plazo. Informe Final Corregido. 2018.
- [202] CNE. Generación Distribuida - Instalaciones Inscritas · Comision Nacional de Energia n.d. <http://datos.energiaabierta.cl/dataviews/235587/generacion-distribuida-instalaciones-inscritas/> (accessed June 16, 2021).
- [203] Jacobson MZ, Delucchi MA, Bauer ZAF, Goodman SC, Chapman WE, Cameron MA, et al. 100% Clean and Renewable Wind, Water, and Sunlight All-Sector Energy Roadmaps for 139 Countries of the World. *Joule* 2017;1:108–21. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2017.07.005>.
- [204] Moher D, Liberati A, Tetzlaff J, Altman DG, Altman D, Antes G, et al. Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: The PRISMA statement. *PLoS Medicine* 2009;6:e1000097. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000097>.
- [205] Bogdanov D, Breyer C. North-East Asian Super Grid for 100% renewable energy supply: Optimal mix of energy technologies for electricity, gas and heat supply options. *Energy Conversion and Management* 2016;112:176–90. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.01.019>.
- [206] Caldera U, Breyer C. Strengthening the global water supply through a decarbonised global desalination sector and improved irrigation systems. *Energy* 2020;200:117507. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117507>.
- [207] Fasihi M, Efimova O, Breyer C. Techno-economic assessment of CO₂ direct air capture plants. *Journal of Cleaner Production* 2019;224:957–80. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.086>.
- [208] Ram M, Aghahosseini A, Breyer C. Job creation during the global energy transition towards 100% renewable power system by 2050. *Technological Forecasting and Social Change* 2020;151:119682. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2019.06.008>.
- [209] ME. Techos Solares - Programa Techos Solares Públicos. Ministerio de Energía n.d. <https://techossolares.minenergia.cl/> (accessed June 17, 2021).
- [210] ME. Plataforma Financiamiento. Ministerio de Energía n.d. <http://www.minenergia.cl/pfinanciamiento/> (accessed June 17, 2021).
- [211] ME. ESCOS - Autogeneración. Ministerio de Energía n.d. https://autoconsumo.minenergia.cl/?page_id=222 (accessed June 17, 2021).
- [212] Markard J. The next phase of the energy transition and its implications for research and policy. *Nature Energy* 2018;3:628–33. <https://doi.org/10.1038/s41560-018-0171-7>.

Sección II: Trabajo de investigación y publicaciones en el marco de la tesis doctoral

Trabajo de investigación

La Tabla 12 resume el trabajo de investigación realizado en el marco de la tesis doctoral. Además de la participación en ocho congresos internacionales, la estancia de investigación de cinco meses en Finlandia, la publicación de seis artículos en revistas científicas y la revisión de tres artículos, hay dos logros que destacan: el premio recibido en una de los congresos internacionales y la invitación a participar en el Comité Científico de Cambio Climático de Chile.

Tabla 12. Resumen del trabajo de investigación realizado en el marco de la tesis doctoral.

	Descripción
Congresos internacionales	<u>Poster presentation</u> : “Pilot Experience of Education on Electrical Energetic Efficiency to Residential Scale”. At All-Energy Exhibition and Conference. Glasgow, Scotland.
	<u>Presentación oral</u> : “Sistemas Solares Fotovoltaicos Autónomos Auto-gestionados. Un Fenómeno Socio-técnico de Autoaprendizaje: El Caso de la Región de Aysén, Patagonia, Chile”. En el XVI Congreso Ibérico y XII Congreso Iberoamericano de Energía Solar. Madrid, España.
	<u>Poster presentation</u> : “Preliminary Economic Evaluation of the First Grid-Connected Photovoltaic System in the Aysén Region Under the Current Law of Distributed Generation in Chile”. At 12 th International Conference on Solar Energy for Buildings and Industry. Rapperswil, Switzerland.
	<u>Poster presentation (Awarded)</u> : “Lessons Learned for Stand-Alone Photovoltaic System Projects Financed by Governments in Developing Countries: The Case of the Río Ibáñez Commune in the Aysén Region, Patagonia, Chile”. At 35 th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition. Brussels, Belgium.
	<u>Oral presentation</u> : “Aysén, Patagonia, Chile: A territory with Multi-Experiences of Decentralized Electrification for Local Entrepreneurship”. At Second International Conference on Solar Technologies and Hybrid Mini-Grids to improve energy access. Palma de Mallorca, España.
	<u>Poster presentation</u> : “Residential PV Prosumers: Analysis of the reality in Chile”. At 36 th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition. Maeseille, Francia.
	<u>Oral presentation</u> : “The role of renewable energy in the transition toward a fully sustainable energy system in Chile across power, heat, transport and desalination sectors”. At SWC 2019, the ISES Solar World Congress 2019 together with SHC 2019, the International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry. Santiago, Chile.
	<u>Short communication</u> : “Spatial Energy Planning: A Review”. At the 5 th Renewable Energy Sources – Research and Business (RESRB) conference. Brussels, Belgium.
Estancia de investigación	Estancia de investigación de cinco meses realizada en el Solar Economy Research Group of the Laboratory of Electrical Engineering, School of Energy Systems, Lappeenranta University of Technology, Finland.
Artículos científicos	Seis artículos publicados en revistas científicas (que se detallan en la siguiente sección). Uno de ellos publicado en revista indexada en Scopus y los otros cinco en revistas indexadas en el Journal Citation Report de la Web of Science.
Revisión de artículos	Revisión de tres artículos solicitada por revistas científicas indexadas en el Journal Citation Report de la Web of Science.
Comisión científica	Participación en el Comité Científico de Cambio Climático del Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación del gobierno de Chile, para la elaboración del reporte “The Chilean Potential for Exporting Renewable Energy”. Reporte solicitado por el Ministerio de Energía del gobierno de Chile que fue presentado en COP26.

Publicaciones

Esta tesis doctoral se basa en las siguientes contribuciones publicadas en revistas científicas, la cuales forman parte de un compendio de seis artículos:

- (I) **Osorio-Aravena J.C.**, Aghahosseini A., Bogdanov D., Caldera U., Muñoz-Cerón E., Breyer C. (2020). “Transition toward a fully renewable-based energy system in Chile by 2050 across power, heat, transport and desalination sectors”. *International Journal of Sustainable Energy Planning and Management*, 25 pp. 77-94. <https://doi.org/10.5278/ijsepm.3385>

- (II) **Osorio-Aravena J.C.**, Frolova M., Terrados J., Muñoz-Cerón E. (2020). “Spatial Energy Planning: A Review”. *Energies*, 13(20), 5379. <https://doi.org/10.3390/en13205379>

- (III) **Osorio-Aravena J.C.**, de la Casa J., Töfflinger J.A., Muñoz-Cerón E. (2021). “Identifying barriers and opportunities in the deployment of the residential photovoltaic prosumer segment in Chile”. *Sustainable Cities and Society*, 69, 102824. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102824>

- (IV) Ascencio-Vásquez J., **Osorio-Aravena J.C.**, Bred K., Muñoz-Cerón E., Topič M. (2021). “Typical Daily Profiles, a novel approach for PV performance assessment: case study on 2.6 GW large-scale PV systems in Chile”. *Solar Energy*, 225 pp 357-374. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.07.007>

- (V) **Osorio-Aravena J.C.**, Aghahosseini A., Bogdanov D., Caldera U., Ghorbani N., Mensah T.N.O., Muñoz-Cerón E., Breyer C. (2021). “The impact of renewable energy and sector coupling on the pathway towards a sustainable energy system in Chile”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 151, 111557. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111557>

- (VI) Ram M., **Osorio-Aravena J.C.**, Aghahosseini A., Bogdanov D., Breyer C. (2022). “Job creation during a climate compliant global energy transition towards 100% renewable energy across the power, heat, transport and desalination sectors by 2050”. *Energy*, 238, Part A, 121690. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121690>

A continuación, se anexa cada una de las contribuciones indicando el factor de impacto de la revista en que fue publicada y la posición que ocupan dentro de las categorías científicas a las que pertenecen.

Publicación I:

Osorio-Aravena J.C., Aghahosseini A., Bogdanov D., Caldera U., Muñoz-Cerón E., Breyer C. (2020). “Transition toward a fully renewable-based energy system in Chile by 2050 across power, heat, transport and desalination sectors”. *International Journal of Sustainable Energy Planning and Management*, 25 pp. 77-94.

Abstract

Renewable energies will play a significant role in a sustainable energy system in order to match the goal under the Paris Agreement. However, to achieve the goal it will be necessary to find the best country pathway, with global repercussion. This study reveals that an energy system based on 100% renewable resources in Chile could be technically feasible and even more cost-efficient than the current system. The Chilean energy system transition would imply a high level of electrification across all sectors, direct and indirectly. Simulation results using the LUT Energy System Transition model show that the primary electricity demand would rise from 31.1 TWh to 231 TWh by 2050, which represent about 78% of the total primary energy demand. Renewable electricity will mainly come from solar PV and wind energy technologies. Solar PV and wind energy installed capacities across all sectors would increase from 1.1 GW and 0.8 GW in 2015 to 43.6 GW and 24.8 GW by 2050, respectively. In consequence, the levelised cost of energy will be reduced in about 25%. Moreover, the Chilean energy system in 2050 would emit zero greenhouse gases. Additionally, Chile would become a country free of energy imports.

DOI: <https://doi.org/10.5278/ijsepm.3385>

Publicación II:

Osorio-Aravena J.C., Frolova M., Terrados J., Muñoz-Cerón E. (2020). “Spatial Energy Planning: A Review”. *Energies*, 13(20), 5379.

Abstract

Despite the fact that some renewable energy (RE) technologies are already techno-economically viable, the high spatial dilution nature of their sources, together with aspects beyond the techno-economic ones (such as environmental, social, cultural, and other aspects), can become strong constraints and barriers when it comes to their integration into electric systems. Therefore, with the objective of determining whether studies on spatial energy planning (SEP) are addressing these issues, a systematic review has been carried out to address whether SEP studies are considering aspects beyond the techno-economic ones when integrating RE technologies and, if they are being considered, how they are addressed in their analyses and what criteria, factors, and indicators of the aspects that are employed. Apart from the revelation that the concept of SEP has been included within high-quality scientific literature for less than ten years, SEP seems to be an unexploited tool with the potential to provide significant insight into a planning process that could prevent conflicts when integrating RE technologies into electric systems. This would be useful for decision-makers and for accelerating a sustainable energy transition.

DOI: <https://doi.org/10.3390/en13205379>

Publicación III:

Osorio-Aravena J.C., de la Casa J., Töfflinger J.A., Muñoz-Cerón E. (2021). “Identifying barriers and opportunities in the deployment of the residential photovoltaic prosumer segment in Chile”. *Sustainable Cities and Society*, 69, 102824.

Abstract

Photovoltaic (PV) prosumers can play a significant role in the transition toward sustainable cities. However, the implementation of more effective policies which accelerate the deployment of this market is needed. In this study, after an overview of the residential PV prosumer (RPVP) market's status in Chile, critical parameters that can speed-up the deployment of this segment through policy decisions were identified. Considering the local conditions of each regional capital in Chile, the segment is analyzed with widely-used econometric techniques to evaluate the residential PV systems feasibility empirically. The results show that the Chilean regulatory framework is insufficient for exploiting the potential of the RPVP. Without effective policy instruments, high investment costs and low income per household are the main barriers in the deployment of the segment in this country. Therefore, suitable promotion energy policies, regulatory changes, and financing options can accelerate the deployment without majorly impacting on the national budget. This would let citizens help accelerate decarbonization through a more decentralized and democratic energy transition, gaining socio-economic and socio-environmental benefits, based on solar PV technology.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102824>

Publicación IV:

Ascencio-Vásquez J., **Osorio-Aravena J.C.**, Bred K., Muñoz-Cerón E., Topič M. (2021). “Typical Daily Profiles, a novel approach for PV performance assessment: case study on 2.6 GW large-scale PV systems in Chile”. *Solar Energy*, 225 pp 357-374.

Abstract

A growing photovoltaic industry shows exponential deployment worldwide, and it is expected to largely contribute to the energy transition. Because PV technologies will play a major role in achieving global sustainable development and climate goals, driving more energy-efficient scenarios will require efficient approaches to evaluate systems, especially when dealing with big data of a large region or portfolio. In this work, a novel approach for the PV performance assessment of photovoltaic systems, called “Typical Daily Profiles” (TDP), is presented. This approach is tested on the entire PV fleet operating in Chile from 2014 to 2019. The TDP approach can help to calculate key performance indicators, identify the mounting configuration of PV systems, and to detect major technical issues. A detailed validation carried on the Chilean PV fleet confirms the TDP approach's capabilities to provide accurate PV performance results, neglecting external factors such as failures, grid curtailment, or poor operation activities. Chile was chosen due to the large variety of climate zones in its unique geography, which helps to understand the PV performance under different environmental conditions. Besides, this study reveals the immense potential of PV technologies in Chile compared to mature PV markets worldwide. On an annual basis, their unit capacity factors can reach up to 38%, performance ratios above 90%, and the highest energy yield close to 3350 kWh/kWp. Proving to be an accurate tool, the Typical Daily Profiles approach can be easily applied to other PV portfolios in different regions, and a periodical execution could help to identify and understand long-term performance losses.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.07.007>

Publicación V:

Osorio-Aravena J.C., Aghahosseini A., Bogdanov D., Caldera U., Ghorbani N., Mensah T.N.O., Muñoz-Cerón E., Breyer C. (2021). “The impact of renewable energy and sector coupling on the pathway towards a sustainable energy system in Chile”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 151, 111557.

Abstract

The aim of this research is to analyse the impact of renewable energy (RE) technologies and sector coupling via analysing the transition pathways towards a sustainable energy system in Chile. Four energy transition scenarios for the power, heat, transport and desalination sectors were assessed using the LUT Energy System Transition model. The current policy scenario was modelled and compared with three best policy scenarios. The results showed that the transition to a 100 % renewable-based energy system by 2050 is technically feasible. Further, such an energy system would be more cost-efficient than the current policy scenario to reach carbon neutrality by 2050. The results also indicate that Chile could reach carbon neutrality by 2030 and become a negative greenhouse gas emitter country by 2035. In a 100 % renewable-based energy system, solar photovoltaics (PV) would contribute 86 % of electricity generation, which would represent 83 % of the total final energy demand for the year 2050. This would imply the use of about 10 % of the available techno-economic RE potential of the country. Three vital elements (high level of renewable electrification across all sectors, flexibility and RE-based fuel production) and three key enablers (solar PV, interconnection and full sectoral integration) were identified in order to transition to a fully sustainable energy system. Chile could contribute to the global sustainable energy transition and advance to the global post-fossil fuels economy through the clean extraction of key raw materials and RE-based fuels and chemicals production.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111557>

Publicación VI:

Ram M., **Osorio-Aravena J.C.**, Aghahosseini A., Bogdanov D., Breyer C. (2022). “Job creation during a climate compliant global energy transition towards 100 % renewable energy across the power, heat, transport and desalination sectors by 2050”. *Energy*, 238, Part A, 121690.

Abstract

Driven by climate mitigation goals countries around the world are prioritising low-cost renewables for economic growth and recovery from the aftermath of the global pandemic. It is quite clear that sustainable technology choices result in broader socioeconomic benefits, as is shown by countries that have been early movers in transitioning their energy sectors towards higher shares of renewables. There is growing interest in better understanding the direct impact on employment by energy transitions with concerns over jobs lost in the conventional energy sectors, which will be crucial in informing decision making around the world. This research focuses on the net employment impacts of an accelerated uptake of renewable energy that envisages the world deriving 100 % of its energy from renewable sources by 2050, compatible with the ambitious goals of the Paris Agreement. Direct energy jobs associated with the power, heat, transport, and desalination sectors increase substantially from about 57 million in 2020 to nearly 134 million by 2050. Value chains in renewables and sustainable technologies are found to be more labour intensive than extractive fossil fuels. The results indicate that a global energy transition will have positive impacts on future stability and growth of economies around the world.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121690>