

MAURICIO OSSES | CECILIA IBARRA | BÁRBARA SILVA (EDS.)

EL SOL AL SERVICIO DE LA HUMANIDAD

Historia de la energía solar en Chile



Mauricio OsSES es doctor en Emisiones Vehiculares, profesor del Departamento de Ingeniería Mecánica e investigador del Centro Científico y Tecnológico de Valparaíso (CCTVAL), de la Universidad Santa María. Tiene una larga trayectoria como académico en ingeniería mecánica, dictando asignaturas relacionadas con la utilización de la energía, tales como termodinámica y transferencia de calor. Su trabajo de investigación se centra en transporte sustentable y su relación con la calidad del aire y el cambio climático. Entre sus publicaciones destacan su participación en *La calidad del aire en las ciudades - La experiencia de Santiago de Chile* (Fundación Fenosa, 2019) y *Las tecnologías de bajo carbono pueden transformar las flotas de buses en Latinoamérica* (CA0-BID, 2015).

Cecilia Ibarra es doctora en Política Científica y Tecnológica de la Universidad de Sussex, investigadora adjunta del Centro de Ciencias del Clima y la Resiliencia (CR2) e investigadora del Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA), Universidad de Chile. Su trabajo de investigación se enfoca en los procesos de cambio tecnológico, y en el rol de la ciencia y la tecnología en las transformaciones sociales y políticas relacionadas al medio ambiente y el cambio climático.

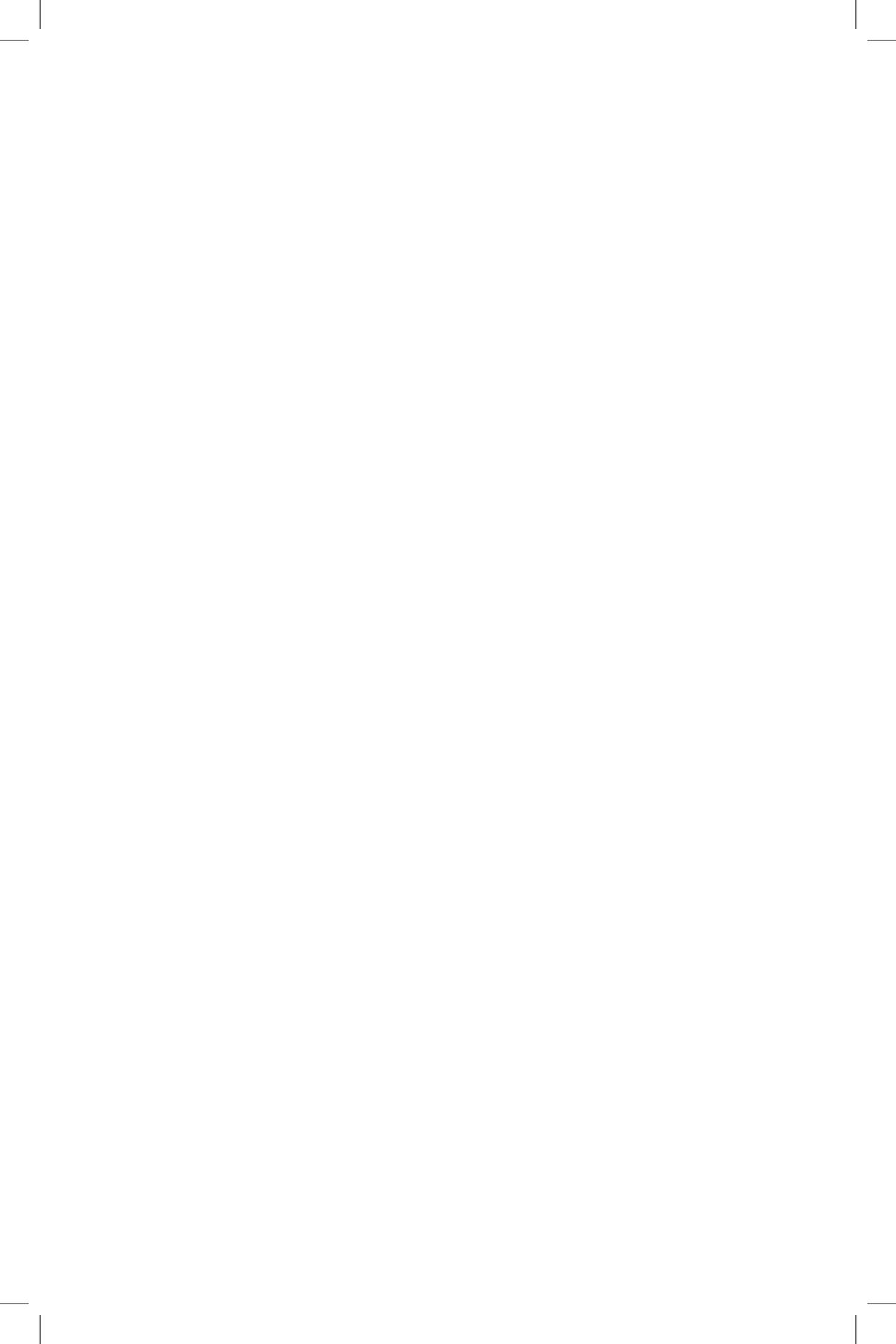
Bárbara Silva es doctora en Historia, y profesora de la Facultad de Filosofía y Humanidades de la Universidad Alberto Hurtado. Su investigación combina la historia de la ciencia con la historia política y cultural del siglo XX, en una perspectiva global. Actualmente trabaja sobre la historia transaccional de la astronomía en Chile durante la Guerra Fría global. Entre sus publicaciones destacan *Identidad y nación entre dos siglos* (Lom, 2008), *Chile. 100 días en la historia del siglo XX* (Planeta, 2015), *Una identidad terremotoada* (UAH, 2018), *Astronomy at the Turn of the Twentieth Century* (Palgrave Macmillan, 2019) y *Estrellas desde el San Cristóbal* (Catalonia, 2019)







EL SOL AL SERVICIO DE LA HUMANIDAD



MAURICIO OSSES • CECILIA IBARRA • BÁRBARA SILVA
(EDITORES)

EL SOL AL SERVICIO DE LA HUMANIDAD

Historia de la energía solar en Chile



RiL editores



UNIVERSIDAD TÉCNICA
FEDERICO SANTA MARÍA

SERC  **CHILE**
SOLAR ENERGY RESEARCH CENTER

333.79 Osses, Mauricio

O El Sol al servicio de la humanidad. Historia de la energía solar en Chile / Mauricio Osses, Cecilia Ibarra, Bárbara Silva, editores. – – Santiago : RIL editores • Universidad Técnica Federico Santa María, 2019.

220 p. ; 23 cm.

ISBN: 978-956-01-0747-3

1 ENERGÍA SOLAR-CHILE.



*Este libro contó con la aprobación del Comité Editorial
y fue sometido al sistema de referato externo, ciego y por pares.*

EL SOL AL SERVICIO DE LA HUMANIDAD.
HISTORIA DE LA ENERGÍA SOLAR EN CHILE
Primera edición: octubre de 2019

© Mauricio Osses, Cecilia Ibarra, Bárbara Silva (et al.), 2019
Registro de Propiedad Intelectual
N° 309.105

© RIL® editores, 2019

SEDE SANTIAGO:
Los Leones 2258
CP 7511055 Providencia
Santiago de Chile
☎ (56) 22 22 38 100
ril@rileditores.com • www.rileditores.com

SEDE VALPARAÍSO:
Cochrane 639, of. 92
CP 2361801 Valparaíso
☎ (56) 32 274 6203
valparaiso@rileditores.com

SEDE ESPAÑA:
europa@rileditores.com • Barcelona

Composición e impresión: RIL® editores
Diseño de portada: Matías González Pereira
Imagen de portada: Archivos Históricos UTFSM

Impreso en Chile • *Printed in Chile*

ISBN 978-956-01-0747-3

Derechos reservados.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	9
CAPÍTULO 1	
INTRODUCCIÓN.	
HISTORIAS SOLARES DE CHILE EN EL TIEMPO Y EN LA SOCIEDAD	
<i>Bárbara Silva, Cecilia Ibarra y Mauricio Osses</i>	11
CAPÍTULO 2	
INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO DE LA ENERGÍA	
SOLAR EN CHILE (1872-1958)	
<i>Nelson Arellano Escudero</i>	25
CAPÍTULO 3	
DATOS SOLARIMÉTRICOS: MEDICIONES Y REGISTROS	
<i>Mauricio Osses, Miriam Roth y Roberto Rondanelli</i>	45
CAPÍTULO 4	
TECNOLOGÍAS DE TRANSFORMACIÓN DE ENERGÍA SOLAR	
Y ALGUNAS APLICACIONES	
<i>Miriam Roth, Pedro Sarmiento y Cecilia Ibarra</i>	79
CAPÍTULO 5	
PROPUESTAS Y RESULTADOS: LA PARADOJA DEL PAÍS CON	
LA MAYOR RADIACIÓN SOLAR DEL MUNDO QUE DESCARTÓ	
LAS TECNOLOGÍAS PARA APROVECHARLA (1958-2011)	
<i>Nelson Arellano Escudero</i>	127

CAPÍTULO 6

EL DESARROLLO DE LA ENERGÍA SOLAR EN CHILE,
UNA VISIÓN INTEGRADORA

Roberto Román y Cecilia Ibarra145

CAPÍTULO 7

DESAFÍOS Y OPORTUNIDADES PARA LA ENERGÍA SOLAR
EN EL CHILE ACTUAL

*Rodrigo Barraza, Rodrigo Palma Behnke, Samir Kouro
y Ana María Ruz*.....181

CAPÍTULO 8

CONCLUSIÓN
ENERGÍA SOLAR, SU HISTORIA Y SU FUTURO

Cecilia Ibarra, Bárbara Silva y Mauricio Osses207

AGRADECIMIENTOS

ESTE LIBRO COMENZÓ como una iniciativa colaborativa. El primer paso fue la realización de un taller, en el cual convocamos a un grupo pequeño de actores interesados en la historia de la energía solar en Chile. Muy pronto nos dimos cuenta que había un potencial enorme para trabajar colaborativamente entre la ingeniería y la historia, y decidimos dedicarnos a la tarea de elaborar un libro. El siguiente paso fue generar un segundo taller, que tuvo como objetivo precisamente comenzar con la tarea del libro y construir su diseño, proceso en el que sumamos a más actores e instituciones al proyecto.

A pesar de que los tiempos y plazos no estaban a nuestro favor, decidimos hacer coincidir esta tarea con un hito especial, y apostar por obtener un libro en tiempos imposibles. Queríamos insertar la historia de la energía solar en Chile en un evento importante para la comunidad solar, el Solar World Congress de ISES, que se realiza por primera vez en Chile y en Sudamérica en noviembre de 2019. Ya en los años setenta, sino antes, la comunidad solar nacional soñaba con traer el Congreso más importante del área a Chile y, en la emoción de ver este sueño cumplirse, nos comprometimos a sacar adelante este proyecto.

Quisiéramos expresar nuestros agradecimientos al proyecto CORFO Ingeniería 2030 «The Clover», que fue el principal apoyo para hacer realidad este trabajo desde su inicio. Así también, agradecemos el soporte del proyecto FONDAP SERC Chile (Solar Energy Research Center, num. 15110019), que contribuyó con componentes clave para la consolidación del concepto colaborativo que hemos querido plasmar en el libro.

Desde el primer taller y a lo largo de todo el proceso hay dos integrantes del equipo de trabajo que quisiéramos destacar: los ingenieros solares Pedro Sarmiento y Roberto Román. Ellos representan

el eslabón que da continuidad entre las generaciones. Su perseverancia por mantenerse activos en el área desde sus inicios ha sido inspiradora y contagiosa. Ambos han mantenido, además, archivos personales que han sido muy útiles para la construcción de la historia reciente, escasamente documentada, que intentamos rescatar en este libro. Queremos hacer una mención especial para María Cristina Ferrando, Cristi, que amorosamente construyó y mantuvo todos estos años el archivo personal de fotos y documentos de Roberto Román.

La realización de este libro ha recibido los aportes generosos de muchas personas, entre las cuales fue fundamental contar con el apoyo de profesores y funcionarios del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Santa María, quienes acudieron con mucho entusiasmo a nuestras invitaciones para recoger testimonios, revisar documentos, escarbar las bodegas de laboratorios y contactar a aquellos protagonistas que ya no trabajan en la Universidad. Agradecemos a Pedro Serrano, por compartir su experiencia y pasión. También damos las gracias a Roberto Sota, Rafael Bolocco y Francisco Vargas por sus valiosos testimonios. El querido y recordado profesor Pedro Roth estuvo siempre presente, en espíritu, durante muchas sesiones de redacción.

A lo largo del libro la USM, Universidad Santa María, aparece por las siglas que usaba durante el siglo XX, UTFSM, Universidad Técnica Federico Santa María. Quisimos mantener esta sigla de aquellos años, que nos parecía más apropiada para los tiempos a los que refiere la mayor parte del libro.

Queremos agradecer al Laboratorio de Historia de la Ciencia y la Tecnología, que es un espacio que alimenta a proyectos como éste, promueve el desarrollo de la historia en nuestro país y donde encontramos compañeros para nuestra labor.

Este libro es parte de una línea de trabajo de la USM en la valorización de la memoria del laboratorio solar, que incluye además de este libro una serie de entrevistas a los ingenieros pioneros en el área, un video y un archivo fotográfico que están disponibles en el portal de bibliotecas de la USM.

Los editores

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN. HISTORIAS SOLARES DE CHILE EN EL TIEMPO Y EN LA SOCIEDAD

*Bárbara Silva**, *Cecilia Ibarra*** y *Mauricio Osses****

NO ES EXTRAÑO ESCUCHAR, HOY, sobre diversas iniciativas relacionadas con energía solar. De hecho, al caminar por las calles de algunas ciudades se observan artefactos solares como parte del espacio público; incluso en algunos lugares del país podemos ver grandes «granjas» solares, con paneles fotovoltaicos que simulan una suerte de cultivo. También es habitual suponer que esa relación con tecnologías que usan energía solar, cada vez más frecuente, es una característica de nuestro siglo XXI. Sin embargo, la relación humana con la energía solar tiene una larga trayectoria y un pasado a veces sorprendente. Esta historia solar también ha estado presente en Chile, en distintos momentos y a través de diversos procesos, que buscamos rescatar en estas páginas.

El título de este libro, *El Sol al servicio de la humanidad*, refiere a nuestro propósito: explorar la vinculación entre el Sol y los seres humanos. Y es que el Sol parece un elemento evidente de nuestra vida; tan evidente, que no siempre nos detenemos a pensar en él,

* Departamento de Historia, Facultad de Filosofía y Humanidades, Universidad Alberto Hurtado.

** Centro de las Ciencias del Clima y la Resiliencia (CR2), Universidad de Chile.

*** Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Técnica Federico Santa María.

a pesar de que nuestra dependencia de esta estrella es absoluta. Podríamos sostener que la relación de los seres humanos con el Sol es fundamental.

Es habitual que ya en la temprana infancia aprendamos que, sin su energía, no hay vida. Cuántos experimentos con plantas se han hecho en escuelas: una en la oscuridad, la otra expuesta a la luz del Sol. Solo esta última logra vivir. La conclusión que niños y niñas incorporan como parte de sus aprendizajes es aparentemente simple: la presencia del Sol es crítica y determinante para cualquier desarrollo de vida en la tierra. Luego, estos aprendizajes van volviéndose más complejos. Casi anecdóticamente, aprendemos que hace miles de millones de años, cuando un azar de los cuerpos celestes hizo que un asteroide impactara en el planeta Tierra, precisamente, en la península de Yucatán, entre las variadas y masivas consecuencias, hizo que se levantara una cantidad de material particulado tan grande, que los rayos del Sol se vieron severamente disminuidos, y ello incidió directamente en la vida en la tierra¹.

El episodio del asteroide, espectacular y vertiginoso, evidencia una de las ideas centrales de este libro: la relación de los seres humanos con el Sol, aunque constante y dependiente, ha variado con el tiempo. Una de esas variaciones ha sido la pregunta sobre cómo utilizar su energía, más allá de la recepción espontánea de los rayos solares sobre la superficie terrestre.

La relación de las sociedades con la energía solar ha sido diversa y Chile no es una excepción al respecto. En la actualidad, la emergencia que propone el cambio climático implica un creciente desarrollo y visibilidad de las llamadas «energías limpias» o «energías renovables», dentro de las cuales se encuentra la energía solar. Sin embargo, esa urgente necesidad no significa que la energía solar se haya utilizado exclusivamente en esta era. Por el contrario, la dramática situación del medio ambiente actual motiva y promueve que generemos preguntas en torno a los usos pasados de la energía

¹ Douglas Preston, «The Day the Dinosaurs Died», *New Yorker* (April 8, 2019), <https://www.newyorker.com/magazine/2019/04/08/the-day-the-dinosaurs-died>.

solar, más precisamente, que podamos conocer y comprender nuestra historia previa con la energía solar.

Siglos atrás, en torno al XVIII, las sociedades experimentaron un crecimiento exponencial en su demanda energética: la Revolución industrial cambió los parámetros y modos de producción a nivel global, para siempre². La intensificación en el uso de combustibles fósiles, en ese entonces, principalmente el carbón, fue inédita en la historia. Países como Chile, lejos de los centros de producción industrial, experimentaron un proceso más tardío. Quizás desde ese entonces se profundizó la visión de una modernización que, en regiones como América Latina, constantemente se entendía como incompleta³, a partir del anhelo por conseguir una industrialización que estaba lejos de ser real.

A pesar de ese discurso sobre los desafíos de la modernidad, aquellos países que se alejaban de los circuitos de la Revolución industrial experimentaron transformaciones sustantivas. La lógica de los cambios y el desarrollo de diversas tecnologías se extendieron a lo largo y ancho del planeta, hasta las sociedades más remotas. Con ello, es posible observar cómo los desarrollos científicos y tecnológicos circulaban más allá de los espacios hegemónicos de poder⁴.

La energía solar no ha estado ajena a aquellos desplazamientos y circulaciones, y uno de los primeros aspectos que destacamos en este libro es visibilizar cómo aquella experimentación y desarrollo también se produjo en Chile, y no es exclusiva de las últimas décadas. A través de siete capítulos, en este libro se desarrolla y se propone una reconstrucción de esta historia solar chilena, en la época contemporánea, es decir, trabajamos sobre la energía solar desde el último tercio del siglo XIX, hasta la actualidad.

² US Energy Information Administration, «Energy sources have changed throughout the history of the United States» (July 3, 2013), <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=11951>

³ Jorge Larraín, *¿América Latina moderna? Globalización e identidad* (Santiago: Lom ediciones, 2005).

⁴ Lissa Roberts, «Situating Science in Global History. Local Exchanges and Networks of Circulation», *Itinerario* 33: 1 (2009): 9-30.

Con esto no queremos decir que no exista una historia solar previa. De hecho, es necesario recordar que existe una historia de vinculación con el Sol que es mucho más antigua que los desarrollos de tecnologías solares. Si integramos la experiencia de los mundos indígenas que habitaban el actual territorio nacional, los significados que adquiere la energía solar son otros. La relevancia y condición fundamental del Sol incidió no solo en que muchos imaginarios indígenas lo asumieran como una divinidad, sino como la divinidad primordial en su cosmovisión.

Aun cuando en este libro aquella historia solar ancestral está ausente, es necesario explicitar cómo nos conectamos a comunidades que tienen una relación mucho más estrecha con el Sol. Cada solsticio de invierno, cuando la Tierra se aleja del Sol y sus rayos caen de manera oblicua sobre la superficie terrestre, se celebra el reinicio del ciclo de la vida. Es el Sol el que determina ese ciclo anual, tal como determina el ciclo del día y la noche. Viracocha —por mencionar un ejemplo entre muchos— como principio energético vital, está presente en cada expresión de la Tierra y del cosmos, es la energía que hace que el mundo sea mundo⁵.

A través de la divinidad, los mundos indígenas articulaban una elevada comprensión de su entorno y del cosmos y estrechaban una intensa relación con los cielos: allí se trataba de un universo más complejo, en que los cielos, los humanos y los animales conviven en un mismo espacio-tiempo. Detrás de aquella comprensión, encontramos una estructura de vida comunitaria, colaborativa, muchas veces perdida en el carácter vertiginoso, individual y acelerado de las sociedades actuales.

Al investigar sobre la historia contemporánea de la energía solar en Chile, encontramos aquella estructura colaborativa y comunitaria. En medio de la reconstrucción de algunas de las historias solares de Chile, pudimos observar cómo, en medio del siglo xx, se había conformado una comunidad solar que actuaba en conjunto y que colaboraba en proyectos comunitarios. Sin que se acercara a aquella

⁵ José Antonio González, *El catolicismo en el desierto de Atacama: iglesia, sociedad, cultura (1557-1987)* (Antofagasta: Universidad Católica del Norte, 2002).

lógica comunitaria de los mundos indígenas, podíamos construir un paralelo en torno a la historia de la disciplina de la energía solar, en la tradición de la ingeniería, en esta dimensión colectiva.

De este modo, y homenajando aquella tradición de la ingeniería colaborativa que había sido una suerte de sello del desarrollo de la energía solar en Chile, nos propusimos construir este libro. Aquello fue decisivo: era necesario conectarse con los actores de la energía solar en Chile, o con los que continuaron desarrollando la labor de aquellos que habían sido los actores protagónicos de esa historia. Inspirados por las claves de la *historia pública*, la intención no era hacer solo una historia *sobre* la energía solar en Chile, sino una historia solar *con* los protagonistas y testigos de aquella historia⁶. Así, construimos un trabajo de conjunto en el cual no solo traspasamos barreras disciplinarias, sino también abrimos el espacio para repensar algunos prejuicios, solares e históricos. Al trabajar en torno a un libro sobre la energía solar en Chile, pudimos acceder a una experiencia de historia colaborativa que anclaba «una actitud o percepción acerca del uso y valor de la historia»⁷, en torno a tecnologías solares.

En la interacción entre distintas disciplinas logramos movilizar la empatía de la historia, en tanto en el pasado es posible encontrar una serie de significados, clave para lograr autoconciencia y equilibrio, que contribuye a construir comunidades saludables⁸, en especial en un momento de crisis medioambiental. En este sentido, este ejercicio histórico se conecta con la dimensión pública y recupera uno de los aspectos centrales de la disciplina: su función social⁹.

⁶ Thomas Cauvin, *Public History. A Textbook of Practice* (New York: Routledge, 2016), 14-15.

⁷ Hilda Kean, «Introduction», en *The Public History Reader*, editado por Hilda Kean y Paul Martin (New York: Routledge, 2013), XVI.

⁸ «Finding meaning in the past is the essential activity for achieving self-awareness and a life that is in balance, building healthy communities, and forming a just and equitable civic society», Katherine Viens, «Finding Meaning in the Past» en *The Future of History. Historians, historical organizations and the prospects for the field*, editado por Edick Wright y Katherine P. Viens (Boston: Massachusetts Historical Society, 2017), 3.

⁹ Bárbara Silva, «History, Narrative and the Public. Towards a Social Dimension of History as a Discipline», *International Journal of Research*

Ese viaje en el tiempo nos permitió conectar con otros actores y otras mentalidades. Lo entendimos como un ejercicio central para comprender los procesos de desarrollo científico y tecnológico. A su vez, fue decisivo incorporar el clima histórico de aquellos actores, tanto de las primeras experiencias con uso de tecnologías solares en el siglo XIX, como en el desarrollo universitario de la energía solar, en torno a la década de 1960.

Así, pudimos integrar las particularidades de las historias solares con los procesos históricos de ese Chile del siglo XX. Una vez más evidenciamos la interrelación de las dimensiones humanas, mientras la conexión entre los desarrollos científicos y tecnológicos chilenos se hacían parte del devenir político y cultural del país, y viceversa¹⁰. Pero necesitábamos más que la disciplina histórica para comprender ese pasado: la interdisciplina era imprescindible. En este sentido, el trabajo colaborativo *con* los actores de la energía solar nos permitió generar un tejido disciplinario que relevaba a sus propios actores y que, a la vez, tendió puentes entre las humanidades y las ciencias.

A partir de múltiples referencias, que están presentes en este libro¹¹, pudimos comprobar que en aquella comunidad solar había —y hay— una conciencia de su propia historicidad. Aquello se volvió evidente cuando en el proceso de investigación encontramos artículos académicos y técnicos sobre el trabajo de ingenieros solares, principalmente desde la década de 1960 en adelante, y en ellos había referencias a su propia trayectoria histórica, como disciplina. De este modo, la premisa de Marc Bloch se hacía patente: «esta solidaridad entre las edades es tan fuerte que los lazos de inteligibilidad

on History Didactics, History Education, and History Culture 39 (2018): 13-30.

¹⁰ Carroll W. Pursell, «Technologies as Cultural Practice and Production», *Technology and Culture* 51: 3 (July 2010): 715-722.

¹¹ Por ejemplo, B. Cancino, P. Roth y A. Bonneschky, «Review of Solar distillation in Chile 1872-2001», en *7th World Renewable Energy Congress* (Colonia, 2002); Julio Hirschmann, «A Solar Energy Pilot Plant for Northern Chile», *Solar Energy* 2 (1961): 37-43; Julio Hirschmann, «Solar Distillation in Chile», *Desalination* 17 (1975): 17-30; Víctor Bocic, *Antecedentes generales de la energía solar y su aprovechamiento*. Memoria para optar al título de ingeniero mecánico (Valparaíso: UTFSM, 1958).

entre ellas tienen en verdad un doble sentido. La incompreensión del presente nace fatalmente de la ignorancia del pasado. Pero quizá es igualmente vano esforzarse por comprender el pasado si no se sabe nada del presente»¹².

En la actualidad, las urgencias del cambio climático han incidido en generar los esfuerzos para visitar el pasado de la energía solar en Chile; pero para sus propios actores, aquella conciencia y amenaza, producidas por la crisis medioambiental, ya estaban presentes desde hacía décadas. A su vez, ese pasado ilumina e instala experiencias en torno al desarrollo de estas tecnologías. Por cierto, la conciencia histórica de estos expertos hacía visible la deconstrucción del mito que los especialistas técnicos tienden a oscurecer su propia historia. Por el contrario, encontramos un interés y una conciencia de su propia historicidad, aun cuando, más allá de esa comunidad solar, la tendencia fuera asumir que no había una historia solar antes del desarrollo del siglo XXI. Por otra parte, podíamos refutar aquellos supuestos que las historias previas de desarrollo tecnológico han caído en un profundo olvido: al observar aquella conciencia histórica, pudimos comprender los desplazamientos de esa memoria solar para sus propios actores.

En estas historias solares, las experiencias de Wilson y sus procesos de desalación de agua en Atacama en el siglo XIX se recuperaban en los trabajos de la medianía del siglo XX, y luego en el XXI¹³. Asimismo, cuando los esfuerzos investigativos del siglo XX determinaron la necesidad de registros y mediciones solares, visitar la experiencia del Observatorio Montezuma y la iniciativa de Abbot,

¹² Marc Bloch, *Apología para la historia o el oficio de historiador* (Ciudad de México: Fondo de Cultura Económica, 2001), 70-71.

¹³ Entre otros ejemplos, vale la pena mencionar a Julio Hirschmann, «Évaporateurs et distillateurs solaires au Chili», en *Proceedings of the Conference New Sources of Energy, Rome 1961, Volume 6: Solar Energy* (New York: United Nations, 1964), 224-238; Maria Telkes, «Solar Still», en *Proceedings of World Symposium on Applied Solar Energy* (Phoenix, 1955), 73-79; Roberto Rondanelli, Alejandra Molina y Mark Falvey, «The Atacama Surface Solar Maximum», *Bulletin of the American Meteorological Society* 96: 3 (2015): 405-418.

desde la década de 1920¹⁴, era casi inevitable. Además, la experiencia de los registros solares ciertamente irradió a otras áreas, por ejemplo, en las evaluaciones de ESO (European Southern Observatory) para instalar un nuevo observatorio astronómico en el país, en Paranal¹⁵.

Si tenemos en consideración cómo circulaban estas experiencias en torno a la energía solar, era necesario comprender el Chile de mediados de siglo y cómo las universidades comenzaron a adquirir un rol clave en la producción de ciencia y tecnología, aun desde países remotos como el nuestro. En este sentido, el rol del Laboratorio Solar de la Universidad Técnica Federico Santa María (UTFSM) tuvo un protagonismo particular, aunque no fue el único espacio de desarrollo de tecnologías solares. Desde allí, las conexiones con otras universidades, así como con poblados que experimentaron y usaron tecnologías solares, fue destacable. Pero al mismo tiempo, esa pequeña comunidad solar extendió sus vínculos con un circuito internacional, aun en tempranas etapas de este desarrollo¹⁶. Así, las interconexiones iban más allá de las disciplinas, y sumaban espacios y escalas¹⁷.

En estas historias, un espacio en particular tiene una visibilidad especial: el desierto de Atacama. Casi instintivamente, relacionamos las zonas desérticas del mundo con una abundante radiación solar. La presencia del Sol, casi indisoluble del imaginario cálido y seco del desierto, es imprescindible para evocar la sensación de esos paisajes. En Chile, el desierto significa casi directamente Atacama. Es el desierto más árido del mundo¹⁸, y a ello se suma que es la zona con una de las radiaciones solares más altas del planeta.

¹⁴ Douglas V. Hoyt, «The Smithsonian Astrophysical Observatory Solar Constant Program», *Reviews of Geophysics and Space Physics* 17: 3 (1979): 427-453.

¹⁵ Lodewijk Woltjier, «The 'Discovery' of Paranal», *The Messenger* 64 (June 1991): 5-8.

¹⁶ Julio Hirschmann, «A Solar Energy Pilot Plant for Northern Chile», *Solar Energy* 2 (1961): 37-43.

¹⁷ James A. Secord, «Knowledge in Transit», *Isis* 95: 4 (December 2004): 654-672.

¹⁸ W. Rauh, «The Peruvian-Chilean Deserts», en *Hot Deserts and Arid Shrublands*, editado por M. Evenary, M. Noy-Meir y D. Goodall (Amsterdam: Elsevier, 1985), 239-266.

La sensación de vacío del desierto es casi única. El silencio y la ausencia de humedad hacen que esas montañas rocosas deslumbren con los distintos tonos de ocre, liliáceos y amarillos que cubren un horizonte casi invisible, junto con la transparencia de un cielo profundamente azul. En medio de esas enormes extensiones de roca y arena, de pronto interrumpen unas silenciosas placas brillantes, oscuras, que desde el suelo quieren absorber la radiación única de Atacama. Las placas fotovoltaicas de pronto se extienden como grandes campos de cultivo solar, haciendo intermitente esa característica soledad atacameña. Pero, tal como se relata en este libro, la energía solar y sus desarrollos van mucho más allá que la tecnología fotovoltaica. Sin embargo, aquellas otras aplicaciones de energía solar no han tenido la misma visibilidad que aquellas granjas solares.

La energía solar, profundamente democrática, en el sentido que es accesible para todos, ha tenido un desarrollo discontinuo, tanto en el mundo como en Chile. A pesar de la alta radiación de Atacama, el proceso de desarrollo de las energías solar en Chile ha sido variable, interconectado con vaivenes económicos, sociales, políticas públicas y percepciones culturales. Aún más allá, esa aparente continuidad del sol se esfuma al considerar los ciclos solares y evidenciar cómo ellos también han incidido en el estudio del Sol y su conexión con otros desarrollos humanos. Cuando el desarrollo de la energía solar en Chile estaba en plena fase de expansión, en los años sesenta, los científicos estudiaban el fenómeno de los ciclos solares y cómo se asistía a un período de intensa actividad, para pasar, en 1964, a una fase de Sol tranquilo¹⁹.

Así, aun cuando es relativamente fácil comprender la transversalidad social de la energía solar, en el sentido que llega a todos, también tenemos que integrar a aquella comprensión el que la energía solar es dinámica. Desde un inicio, la generación de fotones en una estrella se produce a partir de la conversión de hidrógeno en helio, y la consecuente pérdida de un 0,7 de masa. Hay un movimiento allí, dentro de la estrella, que explica cómo se genera luz, que luego

¹⁹ Nicolai Pushkov y Boris Silkin, «Los años del sol tranquilo», *El Correo. Publicación mensual de la Unesco* XIX (septiembre 1966): 22-28.

es visible a nuestros ojos. Sin embargo, no porque no podamos observar aquel dinamismo, significa que este no existe. De igual modo, desconocer parte de la historia de la energía solar, incluso en Chile, no implica que esta no tenga una trayectoria temporal, con movimientos a veces intensos, y otras veces más soterrados.

En parte, este libro se propone contribuir al conocimiento de esas historias solares, tanto desde su temporalidad como desde su explicación técnica. Por esto, se propone un constante diálogo interdisciplinario entre ingeniería de la energía solar y las historias de esas experiencias. Como primer capítulo, esta introducción busca inaugurar aquella conversación disciplinaria, entre el Sol y la sociedad, y entre la ingeniería y la historia.

El segundo capítulo —después de esta introducción— de este libro, «La investigación y desarrollo de la energía solar en Chile (1872-1958)», de Nelson Arellano Escudero, tiene una intención histórica. A través del recorrido de las experiencias del siglo XIX en el uso de energía solar, y hasta el estudio de Víctor Bocić sobre energía solar en la década de 1950, Arellano entrega su visión en torno a las distintas intensidades con que se ha desarrollado el uso de la energía solar en Chile. Ya desde estos inicios de esta era «contemporánea» en torno a la energía solar, observamos el protagonismo de Atacama. La instalación de pozas de evaporación mediante la acción del Sol para la provisión de agua dulce fue, sin duda, una innovación tecnológica.

El tercer capítulo, «Datos solarimétricos: mediciones y registros», de Mauricio Osses, Miriam Roth y Roberto Rondanelli, presenta en detalle cómo se generan los datos provenientes del Sol, cómo se registran y por qué ello es relevante. El capítulo se inicia con una explicación de la obtención de registros solares, así como de cada instrumento que se utiliza en la labor de recoger datos solarimétricos. Luego, después de las descripciones técnicas de este aspecto clave en la energía solar, se presenta la historia de cómo se ha registrado la irradiancia solar en Chile. En este sentido, los datos solares también tienen su propia historia, que se remonta a la década de 1920 y la acción del Observatorio Solar Smithsonian en Montezuma, en las cercanías de Calama. Con este particular espacio

científico y más de tres décadas de registros solares, Atacama vuelve a relevarse, más allá de su rol de anfitrión de las faenas mineras. La historia de los datos y registros solarimétricos continúa con la creación del Laboratorio Solar, de la UTFSM, y culmina con algunas experiencias de registros solares del siglo XXI.

El cuarto capítulo, «Tecnologías de transformación de energía solar y algunas aplicaciones», de Miriam Roth, Pedro Sarmiento y Cecilia Ibarra, intersecta la especificidad técnica de tecnologías solares con su rol social. En él se presentan los distintos modos de obtener energía solar y cómo se han desarrollado tecnologías que permiten el uso de esa energía en la vida cotidiana. Por una parte, se recuperaron los trabajos de tesis de estudiantes de la UTFSM, desde 1958 hasta la actualidad, de modo de observar no solo el recorrido de la enseñanza en energía solar, sino también los intereses de los jóvenes ingenieros. Por otra, se incluyen aquí artefactos cotidianos que funcionan con energía solar, recuperando la construcción de cocinas y hornos solares, entre otros, desde la década de 1960. Pero las aplicaciones solares no solo incluyen electrodomésticos; por ello se relata cómo se ha experimentado, desde hace décadas, en construcción, arquitectura, calefacción y refrigeración.

A continuación, se encuentra el capítulo «Propuestas y resultados: la paradoja del país de la mayor radiación solar en el mundo que descartó las tecnologías para aprovecharlo (1958-2011)», también de Nelson Arellano Escudero. Aquí, el autor propone, precisamente, esta contradicción: en el territorio nacional se encuentra una abundante radiación solar, pero esta no se condice con su uso y extensión. Arrellano plantea una interpretación de la trayectoria histórica de la energía solar en la segunda mitad del siglo XX, en búsqueda de comprender aquella contradicción, más allá de las labores de la UTFSM.

El capítulo seis, «El desarrollo de la energía solar en Chile, una visión integradora», de Roberto Román y Cecilia Ibarra, aborda los esfuerzos y logros en generar una institucionalidad en torno a la energía solar, a través de una mirada histórica, desde la década de 1950 hasta inicios del siglo XXI. A través de la participación de Román en estas iniciativas, se recupera parte de la memoria en torno

a la intención de promover la energía solar en el país. Al mismo tiempo, los autores vinculan esos vaivenes en la energía solar con el contexto mundial y con la política nacional. Los conflictos de Medio Oriente y la lucha por el petróleo, así como los intereses de la dictadura, entre otros aspectos, tuvieron incidencia en el desarrollo de la energía solar en Chile.

Por último, el capítulo siete, «Desafíos y oportunidades de la energía solar en el Chile actual», de Rodrigo Barraza, Rodrigo Palma B., Samir Kouro y Ana María Ruz, presenta una perspectiva actual del desarrollo de la energía solar en el país. Primero, los autores explican los usos del recurso solar en relación con la posibilidad de desarrollar ciudades inteligentes en Chile, lo que se vincula necesariamente a la generación de redes de energía. Luego, se considera la relevancia de las políticas públicas que articulen una dimensión nacional y global, y se proponen los posibles impactos de la energía solar en el país, si se logra una extensión y penetración masiva.

Para cerrar el libro, proponemos una sección que, más que ser una conclusión, busca abrir las preguntas y las posibilidades a través de la relación de la energía solar y las sociedades.

De este modo, y a través de estos capítulos, buscamos contribuir al conocimiento de cómo se ha llevado a cabo el proceso de desarrollo de la energía solar en Chile, y cómo los sinuosos movimientos de ese proceso de desarrollo han caminado hasta hoy. Si bien existe una conciencia medioambiental que ha llevado a la promoción y desarrollo de fuentes de energía alternativas a los combustibles fósiles, aquella conciencia, en términos históricos, es relativamente nueva. En sus inicios, el desarrollo de la energía solar se vinculó con posibilidades económicas, con los precios del petróleo, con la conectividad y disponibilidad de agua en Atacama, la industria minera, entre otros.

Quizás la historia de la energía solar pueda aparentar cierta tendencia hacia una estructura intermitente. Sin embargo, después de haber indagado en parte de estas historias solares, es inevitable recordar que los aprendizajes —individuales y sociales— no son

lineales, y que los fracasos son inherentes al proceso de innovación²⁰. La costumbre instalada en las sociedades actuales y su orientación al éxito inmediato hace oscurecer el enorme potencial del «fracaso», o bien de los procesos discontinuos, incluso, a veces erráticos²¹.

A pesar de esa apariencia de discontinuidad en el desarrollo de la energía solar y sus aplicaciones técnicas, hay una continuidad que ha estado presente desde sus inicios: la estructura de un trabajo en equipo, de distintas generaciones de ingenieros y técnicos que se han conectado, de un modo u otro, a través de la energía solar. Tal como mencionamos, este libro se construyó bajo esa misma premisa: conectar y vincular a distintos actores de la energía solar en Chile y crear, a través de estas páginas, un espacio de articulación de iniciativas, temporalidades, especialidades y protagonismos. Al concentrarnos en el pasado, buscamos también llegar a aquellos que en algún futuro integrarán estas historias solares.

Nuestro objetivo ha sido contribuir en la reconstrucción de la historia de la energía solar en Chile a través de sus propios actores, en un proceso de recuperación de sus propias historias y de las historias que los anteceden. Además, vinculamos esas historias con los documentos, las fuentes que ayudaron a anclar la memoria, complementar recuerdos y corroborar parte del proceso. Progresivamente, vimos cómo todos estos elementos forman una historia casi poliédrica. Así, distintas facetas se articulan en torno a esta relación entre el sol y las sociedades, en este caso, en una sociedad al fin del mundo, con uno de los espacios de más intensa radiación del planeta.

Al observar tanto el proceso de construcción de este libro como las historias solares de Chile, junto a los múltiples vínculos humanos, sociales, institucionales y globales, constatamos una vez más que las trayectorias lineales, la mayor parte de las veces, son una fantasía. Aquello incluye al desarrollo tecnológico. Junto con aquella progresión imaginada que tantas veces se ha anhelado, hay procesos de

²⁰ David Edgerton, «Technology, or History: What Is the Historiography of Technology», *Technology and Culture* 51: 3 (2010): 680-697.

²¹ Henry Petroski, *To Engineer is Human. The Role of Failure in Successful Design* (New York: St. Martin's Press, 1985).

modernización que parecieran tener una forma de espiral, y quizás, solo quizás, la energía solar es una de ellas. Pero, además, podemos observar una característica evidente y esquivada: el cambio tecnológico no termina nunca. Una vez que un proceso de innovación está cercano a su cierre, abre una nueva puerta y desplaza el horizonte de lo que es posible. Esperamos que la indagación en torno a qué es posible en relación con la energía solar se desplace una y otra vez, más allá de lo que imaginamos hoy.

CAPÍTULO 2

INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO DE LA ENERGÍA SOLAR EN CHILE (1872-1958)

*Nelson Arellano Escudero**

ENTRE 1872 Y 1907, en el desierto de Atacama se construyeron y operaron las primeras tres industrias termosolares para la desalinización de agua del mundo. Por entonces este territorio pasó del control boliviano al chileno. Además, fue escenario para la implementación intermitente de una serie de iniciativas científicas y tecnológicas con fines productivos —varias de ellas ligadas a la minería—, vinculando así tecnociencia, Estado y mercado durante el siglo xx y hasta la actualidad.

En este capítulo se recorre el período que se trascurre desde 1872, con la desaladora solar de Las Salinas, hasta 1958, considerando como hito la graduación del que podría ser el primer ingeniero formado en Chile en el campo de la energía solar. Esto demuestra una versatilidad de producción de energía en Atacama, pero también una fragilidad en el reconocimiento de la cosecha de radiación solar a la matriz energética en distintas dimensiones: desde la ingeniería, los negocios, la política y la sustentabilidad, entre otros.

Se demuestra que, para efectos de la historia de las tecnologías de la energía solar, Chile hizo una contribución importante al mundo

* Universidad Academia Humanismo Cristiano – DETLA; Fondecyt Iniciación No. 11180158 (2018-2021): «Las fronteras solares de Chile: desierto, Antártica, Polinesia y espacio. Una historia de gobernanza y valores sociales de tecnologías solares en zonas extremas (1976-2011)»; Este capítulo ha contado con el apoyo de SERC Chile, FONDAP/CONICYT No. 15110019

en ciencia y tecnología, tanto desde el punto de vista de las ideas y del conocimiento como de la circulación de ingenieros, científicos, inversionistas, inventores y entusiastas de esta energía.

La historia de las tecnologías de la energía solar en Chile resulta sorprendente por la trayectoria y diversidad de herramientas que se desarrollaron a lo largo de los últimos 140 años, tanto en el campo termosolar como el fotovoltaico. Esta ruta de la energía solar permite observar que la evolución tecnológica no está determinada previamente pues su desarrollo se inserta en una compleja red de realidades y necesidades nacionales e internacionales.

A nivel mundial, el caso chileno en cuanto a investigación, desarrollo e innovación en energía solar aplicada revela, al menos, cuatro momentos clave para su ampliación y dominio tanto en el ámbito industrial como doméstico: el período comprendido entre 1872 y 1907, entre 1933 y 1961, desde 1961 hasta 1980 y, ya en el siglo XXI, a partir de 2004 y hasta la actualidad. En los primeros tres intervalos de tiempo mencionados, aunque evidenciaron éxitos parciales en torno a la energía solar, ellos no se reconocen como tales. Por lo tanto, convendría observar con cautela el optimismo del actual desarrollo de energías renovables¹.

Este capítulo aborda los dos primeros momentos, que no constituyen etapas de un desarrollo continuo. Con ello se plantea un llamado a la comprensión del desarrollo actual con un optimismo precavido, pues el devenir de las tecnologías de la energía solar en Chile ha sido accidentado. Aunque la energía solar ya presentaba buenos prospectos en el siglo XIX, su capacidad de alcanzar relevancia en la matriz energética fue —quizás sigue siendo— muy frágil. Fragilidad no condicionada por factores técnicos, sino culturales, es decir, por la influencia de los valores sociales sobre las decisiones respecto de qué tecnología seleccionar y promover. Por lo mismo, la comprensión de los acontecimientos vinculados a la innovación y desarrollo para la cosecha de radiación solar, en sus formas termosolar y fotovoltaica, no resulta sencilla, debido a una serie de obstáculos

¹ Máximo Pacheco, ed., *Revolución energética en Chile* (Santiago: Ediciones Universidad Diego Portales, 2018).

para la historia. Este capítulo se propone conjurar aquellas dificultades basándose en la información compilada a lo largo de 10 años de investigación.² Algunos de los factores que contribuyen a explicar esta dificultad son la fragmentación de la memoria y la inexistencia de una narrativa interesada en articular la inventiva, la inversión y los aspectos ambientales y de sustentabilidad que la energía solar demanda, tanto como es capaz de ofrecer.

También ha sido necesario establecer un marco de entendimiento para la dispersión de las fuentes, lo que se puede explicar, justamente, por la fragmentación de las memorias. Sin embargo, los registros y su amplitud geográfica también son indicativos del tipo de tratamiento que ha tenido el patrimonio industrial y científico en Chile a lo largo del siglo xx.

Desde luego, en este nivel de inconexión incluso los datos icónicos han sufrido de distorsión y, a veces, del abuso de la interpretación de su existencia. El caso más contundente por ahora podría ser el de la desaladora de Las Salinas, que forma parte de este capítulo. Reseñado en más de medio centenar de artículos y libros, aparece con fechas diferentes, confusión entre su inventor y su divulgador y con especulaciones acerca de los motivos y fechas de su cierre, sin que esto último se haya, hasta hoy, comprobado.

Desde luego, es muy interesante observar esta peculiar situación: la ingeniería ha logrado proveer soluciones técnicas para el aprovechamiento de un servicio ecosistémico abundante y generoso, pero la cultura local no ha asimilado este potencial para un cambio tecnológico decidido, aunque se realizaran varios intentos o promesas al respecto. La historia nos permite comprender algunas de las razones de esta paradoja, pero, fundamentalmente, contribuye a formular una serie de preguntas, por ejemplo, si la energía solar será

² Nelson Arellano, *La ingeniería y el descarte artefactual de la desalación solar de agua. Las industrias de Las Salinas, Sierra Gorda y Oficina Domeyko (1872-1907)*, tesis para optar al grado de doctor por la Universidad Politécnica de Cataluña, 2015; investigador responsable Fondecyt Posdoctoral (2016-2018) No. 3160197: «La evolución de la tecnología y el problema de la sustentabilidad: la incidencia de los factores culturales en el descarte de las tecnologías de la energía solar. Análisis de la industria del salitre en Chile (1907-1981)».

la principal fuente de energía en Chile, si son necesarios 44 años (dos ciclos solares) de investigación para acumular suficientes datos, o bien qué tipo de institucionalidad se requiere para la conversión de la matriz energética hacia la radiación solar. Estas son interrogantes que, habiendo sido de interés de un reducido número de investigadores, ha permanecido en el silencio y el olvido.

Para contribuir a la historia de la energía solar, y superar tanto su silencio como el tratamiento superficial del tema³, fue necesario compilar documentación disponible en el Archivo Nacional de Chile, el Massachusetts Institute of Technology (MIT), Arizona State University, University of Delaware, Universidad Politécnica de Cataluña, Fondazione Luigi Micheletti y las colecciones privadas de la Dra. Emmy Delyannis en Atenas y la familia Freed en Santiago de Chile. Ello se complementó con variadas entrevistas, gracias a las cuales fue posible establecer algunas conexiones entre los datos y ampliar las fuentes de la investigación.

De esta manera fue posible acceder a los tres procesos de coevolución de las tecnologías de la energía solar y los valores sociales que inciden en la trayectoria tecnológica: el descarte artefactual (inventos que se usan y se dejan de utilizar), la duración intermitente (inventos que fueron descartados y que reaparecen en tiempos o lugares posteriores) y la continuidad, que representa la idea del éxito de la tecnología.

Este modelo interpretativo, no obstante, debe situarse en el campo social de la cultura ingenieril, un ámbito cultural peculiar cuyas regulaciones, racionalidades, lenguajes y códigos actúan como mediadores para el cambio social. Dicho enfoque permite cartografiar el relieve de las institucionalidades que han impulsado, inhibido o mostrado ambiguas en el estímulo del desarrollo de las tecnologías de la energía solar. Aunque aquí se esboza un cierto mapa de actores, se hace explícito que ello es una tarea pendiente y que esta herramienta podría aportar nuevas posibilidades a la comprensión de los procesos coevolutivos tecnosociales en el caso chileno.

³ Por ejemplo, Sergio Villalobos, *Historia de la ingeniería en Chile* (Santiago: Hachette, 1990).

La complejidad de las situaciones de las distintas líneas técnicas que utilizan energía solar también puede ser comprendida gracias al aporte de Julia Thomas⁴. Ella sintetiza las formas en que se ha escrito la historiografía reciente de la crisis ambiental en cuatro modelos que combinan ecología y economía. En este sentido, las tecnologías de la energía solar pueden comprenderse a partir de esta propuesta. El primer modelo se centra en la apuesta por volver a un punto anterior de la historia en el que el equilibrio de sustentabilidad no estaba amenazado. Thomas nombra este modelo como *retromoderno del capitalhoceno*. El segundo sería el que intenta conectar la dimensión local y la global, habitualmente en un marco de dualidad norte-sur globales, que llama *modelo de doble capa*. El tercero correspondería a las *modernidades paralelas*, que intenta descentrar el relato eurocéntrico-occidental y prestar atención a las trayectorias regionales que complejizan el panorama simplificado de bienestar versus ruina de la globalización. Finalmente, el cuarto modelo es el de *escalas intersectadas*, que proponemos utilizar para la historia de las tecnologías de la energía solar en Chile.

El modelo de escalas intersectadas asume seriamente la multidimensionalidad de los factores que intervienen en una situación. Aquí se comprende que el fenómeno de la gran aceleración económica, desde el siglo XIX hasta nuestros días, moviliza la colisión de distintos actores humanos y no humanos en pequeños espacios territoriales. En este marco interpretativo, la solución de un problema desencadena nuevos problemas o incrementa otros ya existentes. Por lo tanto, se asiste a relaciones de causalidad en múltiples direcciones. Por su parte, la exploración de alternativas de solución puede integrar el decrecimiento económico. Como dice Julia A. Thomas: en esta ocasión, puede que el resultado de la reunión de la historia ambiental con la historia económica no tenga un final feliz⁵.

⁴ Julia Thomas, «Historia económica en el Antropoceno: cuatro modelos», *Desacatos. Revista de Ciencias Sociales* 54 (2017): 28-39; Dustin Mulvaney, *Solar power: Innovation, sustainability, and environmental justice* (Berkeley: University of California Press, 2019).

⁵ Thomas, «Historia económica en el Antropoceno...», 37.

Por ahora, sin conocer el final de esta historia, en la primera parte de este capítulo se ofrece una aproximación a la situación de investigación, desarrollo, innovación y operaciones en las dos principales actividades de energía solar aplicada en el desierto de Atacama entre 1872 y 1907. En la segunda sección del capítulo se tratan los eventos ligados a la desalación solar, con sus proyectos y propuestas. Por último, en la sección tres, se abordan las relaciones entre el sol y la industria, a través de las pozas de evaporación diseñadas por el ingeniero Stanley Freed y la formación e incorporación a la misma empresa por parte del ingeniero de la Universidad Técnica Federico Santa María, Victor Bocic. Se presentan luego las conclusiones, que proponen una hipótesis para intentar responder por qué las tecnologías de la energía solar no han logrado un desarrollo de mayor alcance en Chile.

A través de estas secciones se presenta una síntesis de casos de estudio, para ofrecer un recorrido desde el siglo XIX hasta mediados del siglo XX. Estos casos se insertan en dos ámbitos de cosecha y utilización de la radiación solar: por una parte, la desalación de agua, que apunta a la necesidad del consumo humano; por otra, el uso industrial para la producción de sales. Mediante estos dos ámbitos es posible abordar el campo termosolar.

Con este panorama general se espera aportar a este libro con diferentes experiencias previas a las iniciativas de los últimos 40 años. De este modo, es posible valorar dichas iniciativas ya no como eventos aislados, sino como una manifestación de la profusa creatividad y la convicción persistente de hombres y mujeres interesados en explorar las alternativas viables a las tecnologías «ganadoras», perpetuadas por la selección del devenir histórico, tal como plantea George Basalla⁶.

⁶ George Basalla, *La evolución de la tecnología* (Barcelona: Crítica, 2011).

DESALACIÓN SOLAR: PROYECTOS Y PROPUESTAS

La preocupación por el suministro de agua es un asunto ancestral y generalizado, de hecho, obras hidráulicas se pueden encontrar en prácticamente todas las culturas⁷, tanto como artefactos vernáculos, como vasijas de cerámica para filtrar las sales del agua. Por otra parte, el problema del crecimiento continuo de la producción económica enlazó la demanda por alimentos con las formas industriales de domesticación y cosecha de especies vegetales. Lo anterior, sumado a la preocupación por la disponibilidad de agua, implicó que se orientaran algunas búsquedas a la invención de superfosfatos, lo que ocurrió a inicios del siglo XIX. Así, el proceso de gran aceleración económica incorporó en sus mapas al desierto de Atacama como parte de la red mundial de suministros de nitratos.

En este devenir, durante la primera fase de expansión salitrera entre 1864 y 1928⁸, los problemas de operaciones de minería no metálica encontraron una barrera importante en una demanda de agua superior a la disponible. A su vez, generaron opciones de líneas técnicas capaces de abastecer los requerimientos de la operación industrial de la extracción y procesamiento de los mantos calichales para la obtención de nitratos, así como para la gestión del agua potable.

El uso de maquinaria a carbón para la destilación de agua de mar y aguas continentales con altos índices de mineralización fue una de las primeras medidas, cuestión que también era practicada por los pueblos originarios, a juzgar por algunos relatos⁹.

El inicio del ciclo de expansión de la industria salitrera fue el momento en que la cosecha de energía solar encontró un lugar para su aprovechamiento. En 1872 se inició la construcción del ferrocarril

⁷ Paul Trawick, *The Struggle for Water in Peru: comedy and tragedy in the Andean commons* (Palo Alto: Stanford University Press, 2003).

⁸ Sergio González, «Las históricas relaciones entre Tarapacá y Oruro: la frustrada tentativa de integración transfronteriza durante el ciclo de expansión del salitre (1864-1928)», *Revista de Geografía Norte Grande* 50 (2011): 63-85.

⁹ Trawick, *The Struggle for Water...*

que recorrería desde Antofagasta hasta Bolivia¹⁰, un trazado que apuntaba a incrementar el volumen y velocidad en la extracción del nitrato, el boro y otras sustancias no metálicas que se añadían a la explotación de la minería de la plata, tanto en Caracoles como en el mineral de Huanchaca. El proyecto de construcción de esta línea férrea tardaría un par de décadas en completarse y, por supuesto, contemplaba el desafío del problema de la gestión del agua.

Por lo mismo, no es de extrañar que en 1872 se haya construido la industria desaladora de Las Salinas. Sin embargo, salvo algunos datos comprobados, la mayor parte de su historia permanece en el misterio. Uno de los actores clave para esta desaladora es Charles Wilson, quien nació en Estocolmo, vivió en Brooklyn y llegó a Chile junto con la construcción de los ferrocarriles de Chañaral. Wilson habría ideado un sistema de efecto invernadero de cajones de madera cubiertos de vidrio e interconectados por cañerías que destilaban el agua subterránea del acuífero de Sierra Gorda, bombeada gracias a molinos de viento. Sin embargo, aún no ha sido acreditado cómo llegó a este diseño de desalación.

Sus cajones articulaban una superficie de casi media hectárea, capaz de producir cerca de 18 mil litros de agua destilada en un día de verano. Esta productividad se explicaba tanto por la radiación solar cosechada, como por el viento frío del desierto de Atacama, que lograba mantener la temperatura exterior del vidrio lo suficientemente helada. Con esto, el vapor interior se condensaba y generaba el caudal que, gracias al testimonio del ingeniero en minas Alejandro Bertrand¹¹, sabemos que se acumulaba en grandes estanques subterráneos.

El ingenio de la destilación solar ya estaba consolidado como idea y se habían generado prototipos, por ejemplo, en Nueva York, en un área cercana al lugar que transitó Charles Wilson. Además, se sabe de la peculiar coincidencia de la presencia del ingeniero sueco

¹⁰ El nombre de la compañía era Ferrocarril Antofagasta Bolivia.

¹¹ Alejandro Bertrand, *Memoria sobre las Cordilleras del Desierto de Atacama i Rejiones Limítrofes Presentada al Señor Ministro del Interior* (Santiago: Imprenta Nacional, 1885).

afincado en la costa este de Estados Unidos de América, John Ericsson, quien tuvo interés e investigó la energía solar, generando una contribución importante con un modelo de motor solar. Ericsson sostuvo discusiones conceptuales y teóricas con August Mouchot en Francia y, por ello, parece razonable sostener que, durante el siglo XIX, se constituyó una comunidad de investigadores-inventores pionera en los usos y aplicaciones de la energía solar¹².

No obstante, este ambiente no parece haber sido masivo ni representado más que el interés de un reducido grupo de ingenieros y algunos científicos, con un número poco más amplio de entusiastas e inventores. Esto se puede concluir a partir de los hallazgos de patentes de fines de siglo XIX con artefactos que utilizan energías renovables¹³ y que, por ejemplo, en el caso de Aubrey Eneas, que creó un motor solar, su invención producida en Boston fue patentada también, al menos, en México y Chile.

Los casos anteriores permiten sostener que Charles Wilson no fue un inventor aislado ni completamente innovador, salvo en la dimensión productiva que alcanzó: una escala de producción de agua destilada gracias a la energía solar que nunca se había logrado. Esto implica que ejecutó un proyecto de ingeniería en el que la materialidad y el uso de los elementos disponibles en el entorno hicieron rentable su desempeño. Pero, más allá de eso, Wilson sostuvo que su industria desaladora solar le había ahorrado a la posteridad 16 mil toneladas de carbón que habría consumido una máquina destiladora, o resacadora (como se les conocía en la época), en los 11 años de funcionamiento que Las Salinas había alcanzado en 1883.

La existencia de Las Salinas fue conocida en el hemisferio norte desde 1883, es decir 11 años después de haber sido construida, gracias a publicaciones en, al menos, Londres, Nueva York, Oklahoma y Madrid¹⁴. Esta experiencia fue recuperada en la década de 1950 por

¹² Arellano, *La ingeniería y el descarte artefactual...*

¹³ Bernardita Escobar y Nelson Arellano, «Green Innovation from the Global South. Renewable Energy Patents in Chile 1877-1910», *Business History Review* 93:2 (2019): 379-395.

¹⁴ Arellano, *La ingeniería y el descarte artefactual...*

la Dra. Maria Telkes en Estados Unidos, quien entregó información de su existencia al ingeniero Julio Hirschmann, de la Universidad Santa María de Valparaíso. A partir de ese momento, Las Salinas se transformó en un ícono para los y las iniciados en las tecnologías de la energía solar. Sin embargo, la existencia de las otras industrias del siglo XIX —Sierra Gorda y Domeyko— fue bastante desconocida.

Hasta mediados del siglo XX, la experiencia pionera de Las Salinas aparece como un evento aislado. Pero los datos que el investigador y coleccionista Patricio Espejo Leupin recopiló nos abrieron un nuevo horizonte de posibilidades. Él detectó dos relatos de geomensores que utilizaron una industria desaladora solar como punto de referencia para sus mediciones. Ambos informes fueron elaborados con ocho años de diferencia, uno en 1886 y otro en 1894, pero tenían un propósito común: establecer coordenadas geográficas. Esto permite tener certeza de la ubicación de esta instalación. La desaladora pertenecía a Juan Oliveira y estaba en la localidad de Sierra Gorda, 50 km hacia el este de Las Salinas. Por lo tanto, sabemos que esta segunda industria solar estaba activa en 1886 y 1894. La destiladora de Sierra Gorda ofrecía, aparentemente, un suministro de 40 mil decalitros por cada 24 horas, lo que la habría hecho el doble de productiva que Las Salinas. Sin embargo, no existen antecedentes detallados de su funcionamiento que permitan establecer un rendimiento. Además, ese dato debe ser matizado ya que para la extracción del agua se utilizaba una bomba a carbón, lo que podría haber implicado un pretratamiento al proceso de destilación. Ese tratamiento previo es aún una conjetura, porque no se ha encontrado documentación con datos más precisos.

Tampoco tenemos antecedentes o documentación que indique la fecha ni eventos asociados a la desaparición o cierre de esta segunda desaladora. Sin embargo, su cercanía temporal y geográfica con Las Salinas permite sostener una hipótesis acerca de la difusión de la técnica, la transferencia de tecnologías y los procesos sociales

de la ingeniería en los que el conocimiento se moviliza, resitúa o reinterpreta¹⁵.

Aunque esta conexión entre Las Salinas y la desaladora de Sierra Gorda es plausible, concebir una relación entre estas dos experiencias inaugurales y la tercera —la Oficina Domeyko— parece aventurado. Durante cerca de 80 años se creyó que una fotografía de una desaladora solar en el desierto de Atacama, fechada en 1908, correspondía a Las Salinas. No obstante, la comparación de la descripción de 1883 elaborada por Harding con la fotografía de 1908 dejaba en evidencia diferencias que solo podían significar cambios importantes en el diseño o que se trataba de instalaciones distintas. En 1907, y probablemente en 1908, la desaladora solar de Oficina Domeyko fue fotografiada en lo que parece haber sido el proceso de inicio de sus operaciones. La publicación de estas fotografías, tanto en Antofagasta como en Londres, puede tener varias interpretaciones; una de ellas es el interés de los propietarios Ottorino y Nicolás Zanelli en vender el conjunto de las instalaciones y derechos de explotación a Casa Gibbs Ltd¹⁶.

Y aunque, por ahora, no se han hallado testimonios de su cierre ni es posible indicar su lapso de funcionamiento, sí se conocen algunos datos que ilustran su dimensión. Se informó que disponía de 20.000 pies cuadrados (aproximadamente 2.000 m²) de vidrio y que era capaz de producir 950 galones imperiales británicos, poco más de 4.300 l de agua fresca diaria¹⁷.

Todas las desaladoras construidas entre 1872 y 1907 desaparecieron sin que se conozca ni su proceso de diseño ni el cese de sus operaciones, las que, por sus dimensiones, debieron haber implicado trámites administrativos. Tampoco hemos llegado a establecer

¹⁵ David Edgerton, «Innovation, Technology, or History What is the Historiography of Technology About?», *Technology and Culture* 51: 3 (2010): 680-697.

¹⁶ Nelson Arellano, «Éxitos y descartes de las tecnologías de la energía solar en la industria de los nitratos (1872-2012). Exploraciones en los archivos de una historia fragmentada», *Tendencias y perspectivas de la cultura científica en Chile entre los siglos XIX y XXI*, ed. Carolina Valenzuela (Santiago: RIL editores, 2019), en prensa.

¹⁷ Arellano, *La ingeniería y el descarte artefactual...*

si hubo algún tipo de conexión o agente social que conectara las tres experiencias. Sin embargo, su emplazamiento territorial en el desierto de Atacama, habla del interés de la ingeniería en cosechar la radiación solar y domesticar procesos termodinámicos.

Precisamente, esa historia técnica puede ilustrar la interacción de los valores sociales con las trayectorias caóticas de la evolución de la tecnología, pues los esfuerzos desplegados en el último cuarto del siglo XIX, que luego desaparecieron y olvidaron, fueron recuperados como testimonio por una ingeniería que se volcó a la investigación y desarrollo a mediados del siglo XX. Parte de ese interés se debió a los pronósticos alarmantes de la dependencia de los hidrocarburos que la civilización occidental había llegado a desarrollar a lo largo del siglo. Por esto, a partir de la década de 1960 comenzaría la experimentación con esta tecnología en una treintena de sitios en el mundo. Aun así, en esta nueva ocasión la destilación solar no corrió una mejor suerte en el proceso de selección de tecnologías. Aunque el argumento habitual se sitúa en el costo en la métrica crematística —es decir, en dinero—, es necesario analizar los resultados en una lógica de sustentabilidad, incluyendo la eficiencia en términos de energía y materia.

En la contracara de los procesos de selección tecnológica encontraremos la evaporación solar, con un gran rendimiento económico pero con importantes efectos ambientales que, ciertamente, aún no han sido explorados.

EL SOL Y LA INDUSTRIA DE LAS SALES

En la evolución de los usos de la energía solar en la industria en Chile existieron aplicaciones en varias líneas técnicas, pero a mediados del siglo XX se incorporó una que definitivamente ha tenido un desarrollo de continuidad y expansión como ninguna otra: las pozas de evaporación solar¹⁸.

¹⁸ Nelson Arellano, «La energía solar industrial en el desierto de Atacama entre 1933 y 1952: investigación, desarrollo y sustentabilidad», *Estudios Atacameños* 57 (2018): 119-140.

El desierto de Atacama parece haber sido el tercer sitio en el mundo donde se implementó esta técnica. El proceso de cristalización fraccionada permitía la obtención de subproductos del salitre, lo que comenzó a ser estudiado en la década de 1930, aparentemente a cargo del ingeniero M. E. Martínez, en la Oficina Los Dones. No fue sino hasta fines de la década de 1940 que se concretó el diseño del ingeniero Stanley Freed, quien alcanzó a ver construidas cuatro de las primeras 10 pozas de evaporación solar proyectadas. Entre 1948, cuando se construyeron las primeras cuatro pozas de evaporación solar, y la actualidad, la utilización de esta técnica se incrementó en superficie y producción en escala exponencial. Además, se amplió su utilización desde la producción de magnesio y potasio hasta el litio, cuyos primeros experimentos se realizaron a fines de la década de 1970, aunque diversas pruebas ya se habían realizado en las décadas anteriores.

El caso de las pozas de evaporación es muy interesante, con relación a la elaboración de la historia de la tecnología en Chile y los modos de administración de la memoria en la cultura local. Se debe destacar que este desarrollo técnico fue divulgado a través de la prensa local y que su existencia fue resaltado, incluso, por el entonces candidato a la presidencia de la República Eduardo Frei Montalva en la campaña de 1958¹⁹. El fallecimiento de Stanley Freed fue también parte de los contenidos tratados en diarios locales del Norte Grande, en Santiago y en la revista *Time* de Estados Unidos²⁰.

No obstante, la memoria en torno a este hito se fue diluyendo en los olvidos al punto que la complejidad del aporte técnico no ha obtenido una atención significativa. Las pozas de evaporación solar son artefactos que requieren una gestión sofisticada en el desierto de Atacama: deben lidiar con los fenómenos astrofísicos de la radiación solar, los atmosféricos de instalaciones de gran extensión al aire libre, la hidrogeología del lugar más árido del mundo y la sismicidad de la zona. A ello se debe añadir que la observación crítica con respecto a la pérdida termodinámica total en el proceso de evaporación, hecha

¹⁹ Eduardo Frei, *Pensamiento y acción* (Santiago: Editorial del Pacífico, 1958).

²⁰ *Time, The weekly magazine* (April 20, 1956): 23.

por Julio Hirschmann en la década de 1960, debe ser estudiada con una perspectiva de sustentabilidad que en el siglo XXI tiene una connotación distinta en función del conocimiento reciente de los efectos antrópicos²¹.

Por lo tanto, la historia del éxito técnico en el aprovechamiento de la cosecha de la radiación solar para la cristalización fraccionada debe contrastarse con los potenciales efectos adversos en eventuales impactos ambientales. Esto nos pone en el campo del estudio crítico de las escalas intersectadas, es decir, intentar comprender la complejidad de los procesos de modernización y entender que el uso de una fuente de energía limpia no garantiza la sustentabilidad.

Sin embargo, el diseño de pozas de evaporación solar constituye, por lejos, el mayor uso industrial de la energía solar. Por lo tanto, resulta más clamoroso el silencio y los olvidos que han operado que recuperar los detalles acerca de esta historia de la tecnología. Es por ello que, aun cuando la investigación para el desarrollo de esta técnica comenzó al menos en 1933 y llegó a implementarse en 1948, un momento clave fue la década de 1950, cuando se produjo una conexión entre el ámbito político, económico y académico. Las empresas Anglo Chilena y Lautaro Nitrate Company eran corporaciones gemelas que contaban con el mismo directorio y cuya correspondencia se copiaba para ambos archivos. A raíz de la creación del proceso industrial de la obtención de potasio y magnesio a través de las pozas de evaporación solar, los abogados de estas compañías, de propiedad de la familia Guggenheim, en Nueva York, concluyeron la necesidad de realizar una fusión, de manera que se creó la Compañía Salitrera Anglo Lautaro²².

La década de 1950 resultaba decisiva para la emergencia de la energía solar como campo de exploración y desarrollo en el mundo, también en Chile. Julio Hirschmann se enteró de los trabajos de investigación de Harold Heywood en el Imperial College de Londres y tomó la decisión de enfocar su estudio en la energía solar aplicada.

²¹ Julio Hirschmann, «Evaporadores y destiladores solares en Chile», *Scientia* 28: 116, J. (1961): 27-45.

²² Arellano, «La energía solar industrial...»: 119-140.

Aquello convergía con el encargo del rector de la Universidad Santa María de la época, Francisco Cereceda Cisternas, para investigar en alternativas en el suministro de energía para Chile.

El interés por la energía solar crecía. A mediados de esa década se creó la Association For Applied Solar Energy (AFASE)²³, que luego devino en la International Solar Energy Society (ISES). En Chile, en 1957, en la entonces Universidad del Norte, actualmente Universidad Católica del Norte, el físico Carlos Espinosa Arancibia formó el Centro de Investigaciones de Energía Solar Aplicada (CIESA). El Dr. Espinosa, junto con investigadores como Orlayer Alcayaga y Carlos Portillo, entre otros, compartió responsabilidades en investigación y desarrollo en aplicaciones de energía solar con Julio Hirschmann Recht, Germán Frick y otros, en la Universidad Santa María. En 1960 conformaron el Laboratorio de Energía Solar en esa universidad. Luego, en 1963 se fundó la Asociación Chilena de Energía Solar Aplicada (ACHESA), presidida por Julio Hirschmann y cuyo secretario fue Carlos Espinosa²⁴.

En ese momento y bajo esas circunstancias, en 1958 Víctor Bocic Arzic se graduó como ingeniero mecánico²⁵. Bocic estudió en el Liceo de Hombres de Antofagasta, luego en la Universidad Técnica Federico Santa María, donde se tituló, en 1958, con la memoria «Antecedentes generales acerca de la energía solar y su aprovechamiento». Hizo sus estudios de posgrado en la Universidad de Wisconsin, donde obtuvo el grado de máster en Ingeniería Mecánica. En la Universidad Santa María se desempeñó como profesor de Termología y Termodinámica

²³ Se ha de destacar que, en el mismo año, 1955, se organizó una institucionalidad similar para los usos pacíficos de la energía nuclear. En 1952, una comisión del Congreso de los Estados Unidos de América emitió un informe señalando la necesidad de explorar alternativas energéticas, dada su alta dependencia de los hidrocarburos.

²⁴ Nelson Arellano, «El desierto de Atacama como laboratorio: experimentos y tecnologías de la energía solar (1872-1981)», *Aldea Mundo* 22: 44 (2017): 81-89.

²⁵ Bocic nació en Antofagasta el 28 de junio de 1934. Casado con Aida Bermúdez Aranzibia, sus hijas fueron: Elena Pierina y Vesna María. Su padre, Antonio Bocic Carevic, hijo de Víctor y Magdalena, había nacido en Supetar (isla de Brac, Croacia), en 1903.

en 1962 y 1963. Anteriormente, entre 1959 y 1960, fue ingeniero mecánico proyectista de la Compañía Salitrera Anglo Lautaro²⁶.

En su trabajo de pregrado, Víctor Bocic recogió un interés que Julio Hirschmann había desarrollado a un alto nivel con poco tiempo de anticipación. Consideremos, como ya ha sido consignado²⁷, que en una primera fase Hirschmann abrió paso a una búsqueda más específica que desarrolló durante el resto de su vida académica, y que concentró sus esfuerzos en torno a la energía solar y sus aplicaciones.

El primer paso en esa dirección lo dio con su artículo «Consideraciones sobre el consumo de energía de nuestro país»²⁸. Su exploración también incorporó otras fuentes energéticas que no eran la energía solar: en 1954 publicó «Sobre las posibilidades de aprovechar la energía geotérmica en Chile» y, en 1956, «Clasificación de reactores nucleares de fisión»²⁹.

Por lo anterior, las 219 páginas de la tesis para obtener el título de ingeniero mecánico de Víctor Bocic, materializan la evaluación que Julio Hirschmann había considerado óptima para el desarrollo de Chile. Esta tesis se divide en tres partes: Antecedentes generales acerca de la energía solar y su aprovechamiento, Conversión de agua salada en agua dulce, y Anteproyecto de una planta para la obtención simultánea de energía eléctrica y agua dulce a partir de agua de mar, utilizando energía solar. Su trabajo domina de manera integral una ingeniería que aporta un contundente capítulo de antecedentes históricos de las tecnologías de la energía solar, junto a un estudio

²⁶ Desde 1965 comenzó a operar como jefe del Departamento Técnico de la empresa Edwards y Ceruti Ingeniería Industrial S.A. Víctor Bocic fue miembro del Colegio de Ingenieros de Chile, de la Asociación de Exalumnos de la Universidad Santa María y, en 1957, presidente de la Federación de Estudiantes de la misma Universidad. Dane Mataić Pavičić, *Hrvati u Čileu: Životopisi / Croatas en Chile: biografías* (Zagreb, 1998).

²⁷ Nelson Arellano, «Para bien de la humanidad: Julio Hirschmann Recht (1902-1981) y la energía solar en Valparaíso», *Historia* 396, 4: 1 (2014): 11-34.

²⁸ Julio Hirschmann, «Consideraciones sobre el consumo de energía de nuestro país», *Scientia* 16: 75 (1949): 15-36.

²⁹ Julio Hirschmann, «Sobre las posibilidades de aprovechar la energía geotérmica en Chile», *Scientia* 21: 1 (1954): 25-43. Julio Hirschmann, «Clasificación de reactores nucleares de fisión», *Scientia* 23: 3 (1956): 158-173.

de evaluación de alternativas para la solución simultánea de dos problemas: suministro de energía y acceso al agua.

Por otra parte, podemos considerar que, hasta entonces todos los ingenieros, todos hombres, que habían participado en la investigación y desarrollo, habían sido formados fuera de Chile. Quizás la excepción fuera el ingeniero M. E. Martínez, que emitió un informe para la Compañía Anglo Chilena en 1933 acerca de evaporación solar, pero de quien desconocemos cualquier otro antecedente a excepción de ese informe.

En este sentido, podemos considerar a Víctor Bocic como el primer ingeniero que estudió el campo de las tecnologías de la energía solar en Chile. Luego, realizó una tesis de magíster en Wisconsin que se tituló: «Reduction of the Thermal Losses from Solar Flat Plate Collectors»³⁰, lo que demuestra la continuidad del interés en el tema y, además, evidencia las líneas de conexión del proceso de producción de conocimiento.

En ese momento, los dos grandes centros de investigación en energía solar en Estados Unidos eran el Massachusetts Institute of Technology y la Universidad de Wisconsin, liderados por Hoyt Hottel y Farrington Daniels, respectivamente. Las apuestas de estrategia de ambos centros discrepaban en torno a estudiar una solución financieramente realista, o bien, en Wisconsin, soluciones técnicamente viables. En Chile, al parecer, la ruta que se siguió fue esta última.

El trabajo posterior de Bocic fue de circulación entre los ámbitos académico y de la industria. Esto puede valorarse como una forma de integración de distintos espacios sociales y habla de una práctica de investigación público-privada que tuvo desarrollo a través de la Corporación de Fomento de la Producción. Esta institución, aunque había sido creada en 1939, a partir de la década de 1960 se interesó en el potencial de la energía solar, en especial su aporte a la matriz

³⁰ La tesis se encuentra en Verona Shelving Facility, University of Wisconsin, Madison. Hasta ahora, no ha sido posible acceder a ella.

energética, cuestión en la se ha insistido de manera intermitente hasta nuestros días³¹.

CONCLUSIONES

La reunión de memorias fragmentadas en investigación y desarrollo en la cosecha de la energía solar demuestra que la historia de la energía en Chile está aún por escribirse. Todavía más, los casos reunidos en este capítulo solo son la enunciación de microhistorias que deben ser estudiadas con mayor profundidad. A esto se debe añadir que existen campos de trabajo que no han sido abordados, como es el caso de la evaluación solarimétrica, que merecen un reconocimiento por la contribución al conocimiento en ciencia y tecnología a nivel local, nacional y mundial.

Es justamente esta combinación entre tecnología y ciencia la que debe convocar nuestra atención. El caso chileno abre interrogantes en torno a la evolución técnica y las relaciones de los objetos con el conjunto del complejo tecnoinstitucional. Las investigaciones académicas contaron con un cierto nivel de apoyo financiero y logístico, también con redes de conexión nacional e internacional, para procesar y asimilar información de la investigación básica. Sin embargo, el tiempo demostró que la capacidad de desempeño no era robusta y una gran parte de los avances logrados quedaron en el olvido, algunos en calidad de ruinas.

Gracias a esta apreciación también queda en evidencia la imposibilidad del determinismo tecnológico. Por lo tanto, sería conveniente mirar lo que resta del siglo XXI sin concesiones que hagan pensar que las tecnologías de la energía solar conseguirán un predominio en la matriz energética de manera automática y evidente, especialmente en el ámbito de la energía fotovoltaica. El riesgo de construir mitos es alto.

³¹ Nelson Arellano «Búsquedas paralelas del poder solar en la década de 1970: MIT, Universidad de Barcelona, Corfo y Batelle Institute», *Quaderns d'història de l'enginyeria* 16 (2018): 261-276.

Lo anterior se sustenta en la desafección que la cultura local ha demostrado con respecto a las tecnologías de la energía solar que, aunque es una fuente abundante, asequible y democrática, no ha tenido una recepción contundente. Quizás, este ha sido el caso de las herramientas domiciliarias que se presentan más adelante en este libro. En la escala industrial, en cambio, las trayectorias han sido divergentes, considerando las pozas de evaporación solar como una técnica hegemónica y dominante, mientras que la desalación solar ha sido descartada a pesar de sus desarrollos en el siglo XIX.

Es posible afirmar que, en Chile, las experiencias pioneras contribuyeron a la divulgación del conocimiento y estudio del potencial energético termosolar. Actualmente, ellas representan una frontera para las aplicaciones de las tecnologías fotovoltaicas.



CAPÍTULO 3

DATOS SOLARIMÉTRICOS: MEDICIONES Y REGISTROS

*Mauricio Osses**, *Miriam Roth*** y *Roberto Rondanelli****

INTRODUCCIÓN

Este capítulo propone una aproximación conceptual e histórica a las prácticas de medir y registrar el fenómeno de la radiación solar, tanto en Chile como en el mundo. Inicialmente se explican los términos generales de la radiación solar, los instrumentos utilizados para la evaluación de diferentes parámetros solares y las metodologías para el registro de mediciones. Se enfatizan las diferentes magnitudes que se encuentran en los bancos de datos y su relevancia para diferentes aplicaciones técnicas. El objetivo es demostrar la importancia de las mediciones, para luego poder responder las preguntas relativas a qué es lo que se mide, dónde se realizan las mediciones y qué instrumentos se utilizan para ello.

La segunda sección se centra en la historia de las mediciones solares en Chile, desde la década de 1920 hasta la actualidad, y cómo

* Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Técnica Federico Santa María

** Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Técnica Federico Santa María

*** Departamento de Geofísica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile

se crearon las diferentes bases de datos nacionales de irradiación solar. El objetivo es comprender cómo este fenómeno global de radiación solar se sitúa en el territorio chileno y en la historia, tanto nacional como internacional.

Existen varias aplicaciones del uso de la energía solar que utilizan diversas tecnologías, las cuales son explicadas y discutidas en el capítulo 4. Lo que tienen en común estas tecnologías es que el sol provee la energía primaria con la que se producen los procesos de transformación. Contar con información lo más exacta posible sobre la cantidad de energía solar disponible en la ubicación deseada, es esencial para evaluar dicha tecnología, pronosticar y garantizar la producción de energía final, determinar eficiencias globales e individuales y calcular los costos asociados a la tecnología o aplicación solar. Generalmente, es necesario contar con al menos 10 años de mediciones solares en el sector que se quiere utilizar la aplicación para tener una información adecuada, estadísticamente confiable.

Además, es importante que las mediciones registradas se puedan comparar a nivel mundial, por ejemplo, para hacer conversiones de energía y cálculo de eficiencias al implementar una aplicación solar en distintas latitudes. Por ello, los instrumentos utilizados y la metodología de evaluación deben permitir la comparación. La calidad de los instrumentos, generalmente radiómetros, determina la calidad de la medición, es decir, su incertidumbre.

I. RADIACIÓN SOLAR, MEDICIONES Y REGISTRO

El sol emite radiación solar en todas direcciones. Cuando esa radiación alcanza un cuerpo, por ejemplo, la Tierra o un instrumento de medición, la superficie de este cuerpo es irradiada. En el caso de la energía solar, lo que se mide con los diferentes instrumentos es la *irradiancia* que recibe un cuerpo debido a la radiación solar, es decir, un flujo de energía o potencia incidente por una unidad de área (W/m^2). Aquí se hace la distinción entre *irradiancia directa*, si ella viene directamente del disco solar, o *irradiancia difusa*, que llega al cuerpo o sensor indirectamente.

La *irradiancia global* es la suma de ambas: sobre una superficie horizontal en un día normal sin nubes, tiene un valor máximo al mediodía y valores cero en la noche. Si esta se presenta por longitud de onda se habla de la *irradiancia espectral*.

La *irradiación* corresponde a la cantidad de energía que ha llegado a un cuerpo en un intervalo de tiempo (J/m^2), es decir, la irradiancia sumada (integrada) en un intervalo de tiempo, como por ejemplo un día, un mes o un año.

Si bien se conoce con bastante exactitud la potencia de radiación que llega directamente a la capa superior de la atmósfera terrestre, el cálculo del flujo energético debido a la radiación solar sobre la superficie de la Tierra es bastante complejo. Además de la época del año, hora del día y la ubicación geográfica (latitud y altura sobre el nivel del mar), influyen factores climáticos como, por ejemplo, nubes que disminuyen la radiación solar directa, bruma o neblina que aumentan la radiación global difusa, contaminantes atmosféricos, etcétera. Por ello es tan necesario contar con mediciones locales confiables (que se establecen en la norma chilena NCh2902).

1.1 Radiación solar

La radiación solar es radiación electromagnética emitida por el sol que cuenta con un amplio espectro de frecuencias. Debido a la gran distancia entre el Sol y la Tierra se puede considerar que la capa exterior de la atmósfera terrestre es irradiada prácticamente de forma constante a lo largo del año y que, en ese lugar, el flujo de energía que atraviesa una superficie de 1m^2 perpendicular a los rayos solares es de 1367 Watt. A partir de esto se ha acordado internacionalmente la constante solar E_0 con un valor de $1367\text{ W}/\text{m}^2$, valor que varía un 7% al año por la excentricidad de la órbita terrestre alrededor del Sol.

De esta energía, solo una parte llega a la superficie terrestre, dependiendo de los factores atmosféricos ya mencionados y de la distancia que debe atravesar la radiación solar al pasar por la atmósfera. Aquí se define la masa de aire (AM) como la distancia,

en unidades de grosor de la atmósfera (desde nivel del mar), que tiene un haz de radiación solar directo hasta alcanzar una superficie horizontal. AM0 significa que se mide en la capa exterior de la atmósfera. AM1 indica que el sol se encuentra justo sobre la cabeza de una persona parada a nivel del mar, donde la elevación solar (θ) correspondería a 90° con respecto al horizonte.

El valor referencial de radiación solar incidente en un día despejado se toma como 1000 W/m^2 . Esta radiación se compone de un amplio espectro de longitudes de onda, y su máxima intensidad se encuentra aproximadamente a los $0,5\mu\text{m}$, que corresponde a la luz azul y verde. El espectro de radiación solar extraterrestre se puede aproximar a la emisión de un cuerpo negro de 5800 Kelvin con longitudes de onda entre los $0,25\mu\text{m}$ y $3\mu\text{m}$.

La fracción visible del espectro de luz, que equivale aproximadamente al 40% de la energía solar, alcanza en gran medida la superficie terrestre, sobre todo en días despejados al mediodía. El 50% de la energía del sol se compone en gran parte por radiación infrarroja, que interactúa con la atmósfera produciendo irregularidades en algunas longitudes de onda. La radiación ultravioleta corresponde aproximadamente a un 10% y se descompone en tres tipos, dependiendo de su frecuencia. De esa radiación ultravioleta, la UV-A pasa casi por completo a la superficie terrestre. Ella es la causante de que el cielo se vea azul y de que la piel se broncee. La radiación UV-B es absorbida en gran parte por la capa de ozono y la UV-C, que tiene longitudes de onda más pequeñas y mayor energía, es absorbida totalmente por la capa de ozono.

El amplio espectro de la radiación solar permite aprovechar la energía solar de muchas formas mediante diferentes tecnologías que utilizan características ópticas, térmicas, eléctricas y electroquímicas de ciertos materiales para una gran cantidad de aplicaciones. Sin embargo, el comportamiento de algunos materiales varía de acuerdo con la frecuencia, por lo que es importante conocer el espectro incidente.

Esto también es un foco importante del desarrollo tecnológico actual, dado que, hasta el momento, las diferentes tecnologías disponibles comercialmente aprovechan solo una parte del espectro de

la radiación electromagnética emitida por el sol. La combinación de materiales con distintas propiedades permite aumentar la absorción de energía solar con el fin de mejorar los rendimientos de los diferentes procesos o aplicaciones.

1.2 Magnitudes medidas y calculadas

Existen varias magnitudes para caracterizar la radiación solar. Es importante reconocer las diferencias entre cada una de ellas y para cuál aplicación son importantes. A continuación, se describen algunas, que serán de utilidad para entender el análisis de los registros existentes.

Tal como se mencionó anteriormente, la irradiancia en general se define como la potencia irradiada incidente por unidad de superficie (W/m^2). La *irradiancia directa* es la recibida por un pequeño ángulo de apertura enfocado en el disco central del sol. La radiación solar directa generalmente es medida con ángulos de apertura menores a 6° con instrumentos llamados piroheliómetros (la norma chilena NCh 2903 define un ángulo de apertura de 5°). La *irradiancia difusa* es la potencia irradiada que incide sobre una superficie en forma indirecta, ya sea por reflexión o difracción, sin considerar la irradiancia directa. La *irradiancia global* es la suma de ambas irradiancias, que incide sobre una superficie horizontal; cuando es sobre una superficie inclinada se habla de *irradiancia total*. Ambas se miden con piranómetros. Los tipos de radiómetros o instrumentos para medir diferentes magnitudes de ondas electromagnéticas se tratan a continuación con mayor detalle.

La irradiancia es un flujo de energía por unidad de tiempo que varía constantemente a lo largo de un día y más aún entre estaciones del año. Si se integran los valores medidos de irradiancia solar durante un día se tendrá la *irradiación solar* de aquel día por unidad de superficie (J/m^2). Por lo general, son estos los valores que se registran, luego se promedian al mes y posteriormente al año, para así obtener el valor anual de energía incidente en aquella ubicación, es decir la energía disponible por unidad de superficie. La irradiación solar

también se clasifica en directa y difusa, global y total, dependiendo de la medición de irradiancia que fue integrada.

1.3 Instrumentos y medición

Los radiómetros son instrumentos que miden alguna propiedad de radiación electromagnética, ya sea un flujo o una cantidad de energía radiada por unidad de área en el caso de una fuente, o irradiada en el caso de un cuerpo sobre el que incide la radiación. En el caso de la energía solar, las magnitudes medidas son las irradiancias, ya sea directa, difusa, global o total, o bien irradiancia espectral. A continuación, se nombran y describen brevemente los diferentes instrumentos que se suele utilizar en las mediciones solares, a partir de la norma ISO 9060¹.

HELIÓGRAFO

Un heliógrafo registra la insolación, es decir, las horas al día que el cielo ha estado despejado y la radiación solar ha alcanzado la superficie del lugar en donde se mide. Esto se realiza gracias a la radiación concentrada a través de una esfera de vidrio, la cual tiene la energía necesaria para quemar una banda de papel. La banda de papel debe ser reemplazada cada día, manualmente.

¹ British Standards Institution - International Organization for Standardization, *Solar energy. Specification and classification of instruments for measuring hemispherical solar and direct solar radiation* (London: ISO, 2018). <https://bsol.bsigroup.com/Bibliographic/BibliographicInfoData/00000000030315447>



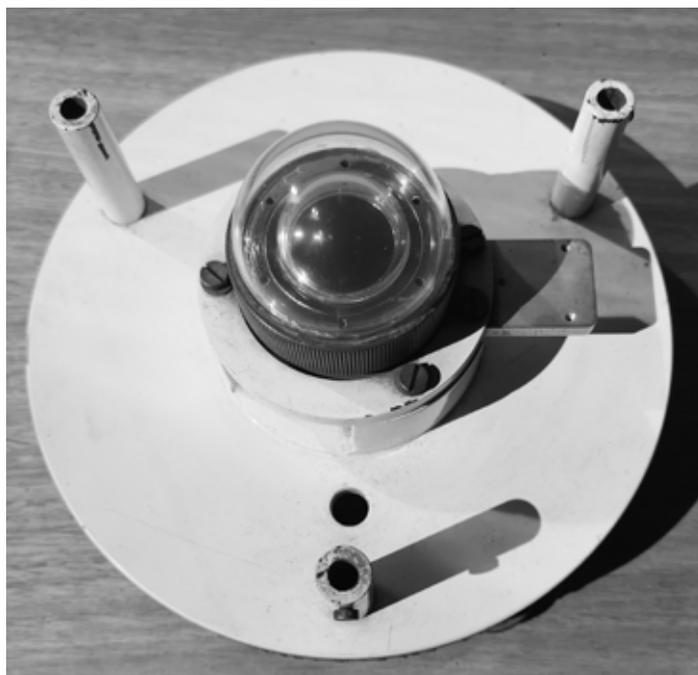
::: Heliógrafo, Departamento de Geofísica, Universidad de Chile
(Fotografía de Mauricio Osses)

El instrumento consiste en una bola maciza de vidrio de aproximadamente 10 cm de diámetro que, a modo de lente, concentra los rayos solares en un foco cercano. A medida que el sol se va moviendo en el cielo, este foco va recorriendo una banda de papel o cartulina fijada en un marco metálico paralelo al vidrio, en semicírculo, detrás de la bola. La concentración del foco va trazando por carbonización una línea oscura más o menos acentuada, según la intensidad de los rayos solares. Si hay nubes o sombra, la línea es intermitente. Una escala sobre la banda permite contar los minutos u horas que la radiación del sol ha estado presente en la superficie durante ese día. El instrumento detecta la irradiancia solar directa, la cual concentra la mayor cantidad de energía solar. Esta información es suficiente, por ejemplo, para aplicaciones solares térmicas simples. Una de las

grandes ventajas es que el instrumento es bastante simple y robusto, no cuenta partes mecánicas que se deterioran con el tiempo. Una gran desventaja es su dependencia del factor humano. Tanto el reemplazo diario de la banda de papel, como la limpieza de la esfera para no distorsionar el paso de los rayos solares por gotas de agua o polvo, como también la posterior evaluación de las bandas quemadas, necesitan una persona para garantizar la calidad de las mediciones.

PIRANÓMETRO

Los piranómetros son instrumentos que se utilizan para medir la irradiancia global o total sobre un plano con un campo visual de 180° (hemisferio). También es posible medir solo la irradiancia difusa con ayuda de un dispositivo parasol (anillo o bola) que suprime la radiación directa. Si un piranómetro además cuenta con un dispositivo registrador de datos, se le llama pirheliógrafo.



∴ Piranómetro, Departamento de Geofísica, Universidad de Chile
(Fotografía de Mauricio Osses)

Los piranómetros se pueden clasificar según su principio físico de funcionamiento. Los principales son termoeléctricos o fotoeléctricos.

El *piranómetro termoeléctrico* cuenta con una pila termoeléctrica (conjunto de termocuplas) bajo dos cúpulas de vidrio. Un extremo es irradiado por el sol, el otro está unido al cuerpo del sensor o a un metal, produciéndose una diferencia de temperatura entre ambos, lo que a su vez genera una diferencia de tensión que es directamente proporcional a la irradiación solar. Las dos semiesferas o domos de cristal concéntricos protegen la superficie receptora, evitan la convección de calor y limitan el espectro de radiación incidente. Este tipo de piranómetro es más preciso, pero también más costoso que el fotoeléctrico.

El *piranómetro fotoeléctrico* es aquel en el que la radiación llega directamente a un fotodiodo que expresa el resultado de la medición de la radiación solar mediante una diferencia de voltaje. Suele estar inmerso en un difusor en forma de cilindro protector y tiene un sensor a base de silicio. Su sensibilidad depende de la longitud de onda de la radiación incidente, por lo que su precisión es menor comparada con otros tipos de piranómetro, pero su costo también es menor.

Según la Norma ISO9060, los piranómetros además se pueden clasificar en A (*secondary-standart*, mayor precisión), B (*first class*) y C (*second class*). De acuerdo con esta norma, los márgenes de error esperados en valores medios diarios para las clases son ± 3 , ± 5 y $\pm 10\%$, respectivamente.

Entre las especificaciones de los piranómetros se pueden encontrar tres características: el tiempo de respuesta (para llegar a 95% del valor final), el corrimiento o inexactitud del sistema de medición (cadena completa) y las dependencias de la respuesta del sensor, que puede ser, a su vez, diferenciada en siete efectos: envejecimiento (inestabilidad), nivel de irradiancia, dirección de radiación directa, error espectral, temperatura del cuerpo del sensor, ángulo de inclinación y errores adicionales del procesamiento de los datos.

De acuerdo con la posición de piranómetro, es posible detectar solo parte de la radiación, por ejemplo:

- *Piranómetro de radiación solar global*: este tipo de piranómetro se encarga de medir la irradiancia sobre una superficie horizontal de la Tierra directamente. Si es sobre un plano inclinado, se llamará piranómetro de radiación solar total.

- *Piranómetro de radiación solar reflejada*: mide la irradiancia que se refleja por la superficie de la Tierra, por lo que se inclina hacia la radiación reflejada y se blindo de la radiación del cielo. Es útil para determinar el aporte energético de una superficie muy reflectante, por ejemplo, salares o campos de hielo.

- *Piranómetro de radiación difusa*: el sensor es cubierto por un anillo o esfera, para evitar la medición de la radiación directa.

Es importante conocer bien las características de estos instrumentos para poder elegir el piranómetro adecuado a la aplicación solar que se busque analizar o la tecnología que se quiere comparar.

Se debe tener en cuenta, además, que la calidad de la medición depende de la calibración, de las condiciones de medición, del mantenimiento de los instrumentos, de las condiciones ambientales circundantes y, en caso de haber, de la resolución del registrador de datos.

La ubicación de los instrumentos también es un factor relevante. Por ejemplo, es necesario ubicarlos en zonas abiertas, a cielo abierto. Es importante que se mantengan en esta ubicación para evitar fallas en la medición. Por otra parte, se debe evitar que haya fuentes de obstrucción de la radiación, tales como edificios, árboles u otros, que puedan producir sombra y alterar el resultado de la medición. Y, por cierto, es necesario que estén lejos de fuentes artificiales de radiación.

Antes de la década de 1960 no existían muchas estaciones meteorológicas que midieran parámetros solares. Una vez incorporados, fue necesario contar con personal capacitado para su instalación, operación y posterior evaluación y registro de los datos. La Universidad Técnica Federico Santa María reconoció este desafío y ofreció asesorías en implementación y procedimientos de medición. De esta forma se realizó la evaluación y el análisis de los datos de irradiancia

global medidos con piranómetros de las diferentes estaciones desde 1961 hasta 1983, según se explica en este mismo capítulo.

PIRHELÍOMETROS (antiguamente llamado piroheliómetro)

Los pirheliómetros son radiómetros que miden la componente directa de la radiación solar normal a una superficie. Consisten en un tubo o cuerpo con una ventana por la que ingresa la radiación solar para luego llegar, perpendicularmente, sobre un sensor plano, que convierte la irradiancia en una señal eléctrica (fotocelda, termopila, u otros). Solo se mide la irradiancia que llega del Sol de manera directa y de una región anular del cielo muy próxima al Sol. En los instrumentos modernos, el ángulo sólido del cono abarca 5° enfocado en el centro del Sol. Si se desea medir esta irradiancia por un tiempo prolongado, estos instrumentos cuentan con un sistema de seguimiento solar que permite la alineación correcta con el Sol.

Dado que el disco solar tiene un radio de aproximadamente 0.267° visto desde la Tierra, en las mediciones también se detecta una parte de radiación proveniente de la aureola solar. En algunos instrumentos antiguos la apertura del ángulo era bastante mayor (por ejemplo, en el pirheliómetro Amströng era de 15°), por lo que las mediciones contenían gran parte de radiación adicional. El ángulo de apertura es una de las diferencias que limita la comparación directa de mediciones históricas, por lo que se deben tomar ciertas consideraciones. Los tipos de pirheliómetros que existen son:



::: Pirheliómetro junto a otros dos instrumentos para medición de radiación solar. Fuente: Laboratorio de Energía Solar UTFSM

- *Pirheliómetro absoluto*: mide la irradiancia en comparación con una escala. Es necesario determinar su característica mediante mediciones de laboratorio y calcular su desviación del comportamiento ideal, con lo que se obtiene un factor que se utiliza para transformar las señales de salida en irradiancias. La incertidumbre en este factor determina la precisión absoluta del instrumento.

Los pirheliómetros absolutos de diseño moderno utilizan receptores de cuerpo negro y medidores de flujo de calor diferenciales calibrados eléctricamente como sensores. Se operan en modo «activo» o «pasivo». En el modo activo, el flujo de calor se mantiene constante durante la fase sombreada y la fase irradiada; la diferencia en la potencia eléctrica durante ambas fases es proporcional a la potencia radiativa. En el modo pasivo, el calentamiento eléctrico se mantiene solo durante la fase sombreada. Cuando el pirheliómetro está en modo activo, las mediciones de radiación se interrumpen periódicamente durante las fases sombreadas de la serie de medición, mientras que en el modo pasivo la fase sombreada ocurre antes de la serie de medición.

- *Pirheliómetro de compensación*: son aquellos que incluyen la sustitución eléctrica de la potencia radiativa incidente y necesitan ser calibrados. El pirheliómetro de compensación Angström, por ejemplo, está equipado con dos receptores adyacentes en un tubo, que funcionan alternativamente: un receptor es irradiado por el Sol mientras que el otro está sombreado y calentado eléctrica y simultáneamente. Esto significa que, durante la fase de sombreado de un receptor, se puede obtener el valor de radiación medido del otro receptor.

- *Pirheliómetros no autocalibrantes*: necesitan ser calibrados para dar irradiancia en Wm^{-2} . Permiten la grabación continua de radiación y se utilizan como instrumentos de campo. Por lo general, cuentan con un encapsulamiento resistente a la intemperie.

Como ya se mencionó en relación con el piranómetro, la calibración de los instrumentos era, y sigue siendo, un factor relevante para comparar datos y predecir la operación de aplicaciones solares. En este sentido, en 1977 la Organización Mundial Meteorológica (WMO, por su nombre en inglés) designó al Observatorio Físico Meteorológico de Davos (PMOD, por su nombre en inglés) como el Centro de Radiación Mundial (WRC, por su nombre en inglés), encargado de administrar un grupo de instrumentos de referencia mundial de irradiancia solar (radiómetros absolutos). Además, este

es el organismo responsable de la difusión internacional de este estándar.

Los instrumentos de referencia de distintos lugares del mundo se reúnen cada cinco años en Davos (Suiza) por tres semanas, para ser calibrados. Estas comparaciones internacionales aseguran la homogeneidad de los instrumentos de irradiancia solar².

1.4 Bases de datos de radiación solar

Existen varias bases de datos solarimétricos que pueden ser consultadas para calcular, por ejemplo, el rendimiento de alguna aplicación solar, o bien la energía que se producirá en una instalación solar. En la mayoría de los casos estas bases de datos solo cuentan con promedios mensuales de mediciones de irradiancia global. Sin embargo, para realizar simulaciones más exactas y analizar el comportamiento de una aplicación solar, a veces es necesario contar con la distribución de irradiancias diaria.

Algunas bases de datos presentan valores modelados a partir de información satelital, es decir, calculan la irradiancia solar a partir de la constante solar mediante la información de nubosidad instantánea y otros factores atmosféricos. La ventaja de este método es que se obtiene información prácticamente inmediata de todas las regiones, sin necesidad de instalar estaciones de medición. Por lo general, los valores simulados se validan con mediciones locales. Sin embargo, sobre todo en regiones de alta nubosidad, los valores de las mediciones realizadas en estaciones meteorológicas y las modeladas con ayuda de satélites distan bastante. Una razón es que las imágenes satelitales son evaluadas mediante fotografías en instantes determinados (resolución temporal que luego es interpolada); mientras que los instrumentos realizan valores promedio de mediciones reales y medidas constantemente a lo largo del día. La diferencia entre la simulación y la medición en regiones con baja nubosidad claramente es menor. Otra consideración es la resolución espacial, ya

² <https://www.pmodwrc.ch/en/world-radiation-center-2/srs/ipc-2/>

que es posible que con el satélite no se registren situaciones locales especiales, como neblina, contaminación, inclinación y reflejo de superficies, entre otras.

Hay que tener presente que, dependiendo de la aplicación, se necesita otro tipo de información. Por ejemplo, para determinar el rendimiento de colectores solares térmicos con seguimiento o con concentradores, los valores de irradiancia global que se miden con un piranómetro no son suficientes, es decir, se deben considerar los valores de irradiancia directa que se obtienen con un pirheliómetro. Un piranómetro con banda o esfera es una buena variante para definir ambos tipos de radiación, pero mayor precisión se consigue con la combinación de un piranómetro y un pirheliómetro con seguidor. Sin embargo, el costo de una estación con ambos equipos aumenta notoriamente; es decir, el costo de inversión de la instalación será clave para decidir cuán exacto debe ser el pronóstico de la ganancia energética proveniente del Sol.

En general, para analizar y proyectar confiablemente una aplicación solar, se necesitan datos medidos en un largo período de años. Algunos estudios demuestran que la desviación del promedio anual de irradiación global, en relación con el promedio de un largo plazo de mediciones, se hace tolerable (menor al 5%) después de promediar valores por 10 años.

Los principios físicos de medición de los instrumentos mencionados para medir la radiación solar incidente no han cambiado mucho a lo largo del tiempo; los sensores del piranómetro y pirheliómetro entregan una señal análoga en forma de voltaje o corriente. Estas señales, generalmente amplificadas, se utilizan en instrumentos antiguos para mover una aguja en una escala graduada, o bien la mueven para graficar con tinta sobre un rollo de papel que gira para sincronizar el tiempo transcurrido. La evaluación posterior de los gráficos antes se realizaba en forma manual, mientras que los valores individuales se anotaban en planillas para luego calcular promedios diarios, mensuales o anuales. Hoy, las señales eléctricas análogas son convertidas a señales digitales para su evaluación y almacenamiento.

Por lo tanto, aun cuando los instrumentos han mejorado su calidad (compensaciones eléctricas y protecciones contra agentes externos), hoy se obtiene una cadena de medición con varios procesos de conversión (AD) y cálculos de rango que tienen gran importancia en la exactitud y la precisión de los datos experimentales.

Por lo general, solo las mediciones ya promediadas o trabajadas matemáticamente se almacenan en tablas y son documentadas. Los expertos en medición, sin embargo, recomiendan guardar también los datos originales, es decir, los registros previos a cualquier conversión o manipulación matemática. Esto se explica porque a veces se han detectado errores en la conversión, o bien se han utilizados los datos originales para un análisis diferente al que se había diseñado en un inicio. Es de suma importancia contar y guardar de manera ordenada y clasificada esta información que no ha sido transformada o distorsionada. Al conservar la información del instrumento y del procedimiento de medición, incluso es posible comparar mediciones realizadas con varias décadas de diferencia.

Otro avance que se ha observado en las mediciones solares es la automatización de ciertos procesos. El proceso de medición del heliógrafo, por ejemplo, requiere el trabajo de un operario para reemplazar los papeles de registro y mantener el instrumento libre de polvo y agua. Luego es necesaria una persona capacitada para determinar las horas de sol, tabularlas y calcular promedios. Este proceso antes no se realizaba en el lugar de la medición, sino que los gráficos diarios, ya quemados, eran enviados en cajas hasta dos meses después a la Universidad Técnica Federico Santa María. Así se buscaba garantizar una evaluación homogénea y profesional y, a su vez, centralizar la información de las diferentes estaciones meteorológicas de Chile. Los gráficos diarios del piranómetro eran integrados manualmente para determinar la irradiación solar global diaria, crear tablas con estos datos que luego se promediaban, mensual y anualmente.

El gran avance en la velocidad y capacidad de almacenamiento de las computadoras permitió digitalizar y almacenar enormes cantidades de señales registradas por los instrumentos para su posterior

estudio estadístico y análisis. La llegada de Internet, además, permitió enviar los datos en forma prácticamente instantánea y compartir los análisis con cualquier persona interesada en ellos.

Actualmente, los datos meteorológicos históricos cobran aún más importancia, ya que podrían aclarar alguna tendencia del cambio climático y los efectos que ha tenido sobre el clima en la Tierra.

A lo largo de la historia se han medido nuevos parámetros que influyen en el uso de la energía solar y en el desarrollo de nuevas tecnologías. Por ejemplo, hay varias estaciones que miden la concentración de aerosoles en la atmósfera, o la medición más detallada del espectro solar (radiación UV o IR), que pueden ser útiles para nuevos estudios, tales como la velocidad de degradación de ciertos materiales, el efecto protector de una crema solar, entre otros.

Si bien las simulaciones numéricas permiten contar con una alta resolución espacial de datos solares, se deben tener en cuenta las limitantes que presentan, mencionadas anteriormente. Cada modelo que es utilizado en un programa de simulación debe ser validado con mediciones reales para poder confirmar la exactitud de dicho modelo. Al fin y al cabo, una medición registra el valor real en un lugar y en un tiempo determinado.

2. REGISTROS SOLARIMÉTRICOS EN CHILE

Las mediciones solares a largo plazo en Chile se pueden separar en tres etapas históricas. El primero corresponde al período comprendido entre 1918 y 1955, cuando el Observatorio Astrofísico Smithsonian de Chile recolectó datos en Atacama, en la estación Calama-Cerro Montezuma. Este observatorio fue una de las tres estaciones mundiales establecidas por el Instituto Smithsonian para recopilar datos que se procesaron en los Estados Unidos, como parte de un esfuerzo global por medir la constante solar y determinar cómo las variaciones de la cantidad de energía proveniente del Sol controlaban el clima terrestre. Las otras estaciones estaban ubicadas en África y Estados Unidos. Junto con la estación chilena configuraban el programa del Observatorio Astrofísico Smithsonian

que cubrió el período entre 1902 y 1962 en el mundo y entre 1918 y 1955 en Chile³.

Un segundo período corresponde al desarrollo de una red local con 89 estaciones que midieron radiación solar a lo largo del territorio chileno entre 1961 y 1983. El análisis de los datos recolectados por estas estaciones estuvo bajo la coordinación del Archivo Solarimétrico Nacional. Esta iniciativa consistió en observaciones de superficie de irradiancia global horizontal y datos simulados de modelos atmosféricos para todo el territorio nacional. Por su parte, la información obtenida fue compartida con varias organizaciones internacionales.

La tercera y actual etapa incluye datos de irradiación por hora recopilados entre 2004 y 2016, a una resolución horizontal de 90 m sobre Chile continental. Los resultados han sido validados utilizando 140 estaciones de irradiancia solar de superficie en todo el país, lo que proporciona una base de datos de radiación solar para Chile⁴.

2.1 Observatorio Astrofísico Smithsonian de Chile (1918-1955)

A principios del siglo xx, científicos norteamericanos ya sabían que la región de Atacama tenía una ubicación solar óptima. Considerando esta característica, en 1918 el Observatorio Astrofísico Smithsonian, dirigido por Charles Abbot, sucesor de Samuel Langley, instaló un observatorio solar en Calama.

En 1918, Abbot comentó brevemente las vicisitudes que concluirían con la instalación de esta estación, luego llamada Monte Montezuma. Allí indicó que la decisión de elegir la región de Atacama no fue estrictamente científica, sino que también se tomaron en cuenta razones asociadas con la política internacional y logística

³ Douglas V. Hoyt, «The Smithsonian Astrophysical Observatory Solar Constant Program», *Reviews of Geophysics and Space Physics* 17:3 (1979): 427-453.

⁴ Alejandra Molina, Mark Falvey y Roberto Rondanelli, «A Solar Radiation Database for Chile», *Nature Scientific Reports* 7: 14823 (2017).

local⁵. Las mediciones de Smithonian comenzaron en Arica, entre 1918 y 1920, pero la estación Calama-Cerro Montezuma fue la instalación operativa más larga del programa Smithsonian entre 1920 y 1955. En esas mediciones, Charles G. Abbot fue clave, ya que fue el director del observatorio hasta 1944.



::: Registros solares del Observatorio Montezuma encontrados en el Desierto, por Roberto Rondanelli (Fotografía de Mauricio Osses)

El objetivo principal de este observatorio era medir rigurosamente los cambios en la constante solar bajo condiciones de mínima perturbación atmosférica por partículas, nubes o vapor de agua. A través de este trabajo fue posible establecer la constante solar de 1.945 cal/cm² por minuto, que fue universalmente aceptada. También se buscó determinar una supuesta periodicidad de 273 meses en la variación de la constante solar. Existen alrededor de doscientas publicaciones del trabajo realizado por este observatorio, la mayor parte escritas por Abbot. De acuerdo con Hoyt, muchas de las conclusiones de este trabajo están teñidas por errores metodológicos que llevaron a

⁵ Charles G. Abbot, «The Smithsonian ‘Solar Constant’. Expedition to Calama, Chile», *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 4:10 (1918): 315.

Abbot a sobrestimar el efecto de las variaciones solares detectadas por sus instrumentos en el clima terrestre⁶. El programa finalizó en 1957, sin establecer una conexión concluyente entre la variabilidad solar y las condiciones climáticas de la superficie⁷. Irónicamente, con la llegada los primeros satélites que midieron la radiación solar desde el espacio, sin las complicaciones insalvables desde la superficie terrestre, se encontró la verdadera periodicidad de 11 años de la radiación solar en 1978, algunos años después de la muerte de Charles Abbott, quien dedicó gran parte de su vida a esta tarea⁸.

Un hecho anecdótico interesante, reportado en una entrevista realizada por Nelson Arellano al ingeniero Carlos Espinosa, se refiere al uso de espejos para transmitir información. Comparando los observatorios del Smithsonian instalados en diferentes lugares, los datos producidos tardaban semanas o meses en llegar a las oficinas de Washington DC, con la excepción de los chilenos. Dada la colaboración de una compañía minera de cobre, propiedad de la familia Guggenheim, fue posible usar su teléfono para llamar a los Estados Unidos y reportar diariamente el informe⁹. Habiendo resuelto de esta manera la barrera comunicacional entre Calama y Washington, otro desafío era hacer que los datos llegaran desde el Observatorio a Calama. Para resolver este obstáculo se habrían utilizado espejos para hacer señales en código morse y, por lo tanto, transmitir los resultados casi en tiempo real.

En julio de 1935 el investigador C. P. Butler participó en una expedición al Monte Aucanquilcha, cerca de Ollahüe, frontera con Bolivia. Butler realizó mediciones de la radiación solar mediante un pirheliómetro Abbot de disco de plata en el campamento Quilcha, a 5.300 msnm, y en la cima del monte Aucanquilcha, a 5.880 msnm.

⁶ Hoyt, «The Smithsonian Astrophysical Observatory...».

⁷ Roberto Rondanelli, Alejandra Molina y Mark Falvey, «The Atacama Surface Solar Maximum», *Bulletin of the American Meteorological Society* 96: 3 (2015): 405-418.

⁸ Douglas V. Hoyt y Kenneth H. Schatten, *The Role of the Sun in Climate Change* (New York: Oxford University Press, 1997).

⁹ David Devorkin, *Charles Greely Abbot 1872-1973, A Biographical Memoir* (Washington DC: National Academies Press, 1998): 10.

Los resultados obtenidos buscaban confirmar la dependencia lineal entre la radiación solar y la presión atmosférica, es decir, los efectos de la masa de aire encima del lugar de incidencia. Los resultados obtenidos en esta investigación fueron publicados en 1936¹⁰.

2.2 Archivo Nacional Solarimétrico (1961-1983)

El Laboratorio de Energía Solar fue fundado en 1961 por iniciativa del profesor Julio Hirschmann Recht, un investigador pionero en el campo de la energía solar, quien fue su primer director hasta 1978. Estaba ubicado en la parte superior de la torre de la Casa Central en la Universidad Técnica Federico Santa María (UTFSM) en Valparaíso, donde tenía un área disponible de aproximadamente 800 m². Hirschmann era consciente de las condiciones únicas de radiación solar en el norte chileno y había establecido contacto con los investigadores que trabajaban en mediciones solares en la región. Como se mencionó anteriormente, el trabajo reportado por Charles Abbot fue decisivo, además difundió el potencial solar del desierto de Atacama¹¹. Desde septiembre de 1957 hasta septiembre de 1958, el Departamento de Investigación de Ciencias Aplicadas de la Universidad de Chile realizó otros registros sistemáticos en la ciudad de Baquedano, en el desierto de Atacama, que fueron publicados por Francois Desvignes y German Frick¹². Sin embargo, a pesar de reconocer estas iniciativas relevantes, Hirschmann declaró que «hasta hace diez años, las mediciones de radiación solar en Chile habían sido esporádicas, se llevaron a cabo en diversas regiones del país y no estaban sistemáticamente relacionadas»¹³.

¹⁰ C.P. Butler, «Observing the Sun at 19,300 feet altitude, Mount Aunconquilcha, Chile», *Smithsonian Miscellaneous Collections* 95: 1 (1936).

¹¹ Charles G. Abbot, *Smithsonian Solar Radiation Research* (Washington DC: Smithsonian Institution, 1951), 372.

¹² Francois Desvignes y German Frick, «Mesures solarimetriques effectuées dans le nord du Chili», *Acta Electrónica Paris*, 3: 2 (1959): 1955-1966.

¹³ Julio Hirschmann, «Records on solar radiation in Chile», *Solar Energy* 14 (1973): 129-138.

Desde un principio, Hirschmann había reconocido que contar con datos lo más precisos posibles era esencial para desarrollar aplicaciones tecnológicas que pudieran competir económicamente con las fuentes convencionales. No solo era importante que los datos se obtuvieran con instrumentos debidamente calibrados, sino también que la elaboración, el registro de valores máximos, la integración para obtener energía solar diaria y la determinación de los valores promedio mensuales se realizaran con un patrón común. Esto permitiría comparar datos registrados en diferentes estaciones y por diferentes organizaciones¹⁴.

Con el objetivo de abordar los problemas anteriores, Hirschmann y sus asociados promovieron varias iniciativas para crear un centro de datos solarimétrico adecuado y organizado para todo el país. En 1965, el Laboratorio de Energía Solar ya tenía 24 instrumentos para mediciones solares y atmosféricas, y se consideraba el mejor equipado del país. Como resultado, en 1965 la Oficina Meteorológica de Chile y la UTFSM firmaron un acuerdo para crear el Archivo Nacional de Evaluaciones Solares en el Laboratorio de Energía Solar. El 5 de diciembre de 1970 se inauguró este Archivo Solarimétrico Nacional en presencia de delegados de las asociaciones regionales de la Organización Meteorológica Mundial de las Naciones Unidas¹⁵.

El Laboratorio de Energía Solar contactó a todas aquellas instituciones chilenas que ya estaban realizando mediciones solares para obtener su cooperación y proporcionar una visión más completa de las condiciones de incidencia de radiación solar en todas las regiones de Chile. Según Hirschmann, estas instituciones fueron la Oficina Meteorológica de Chile, el Ministerio de Obras Públicas (Departamento de Hidrología), la Empresa Nacional de Electricidad, Endesa (Departamento de Hidrología), la Universidad de Chile, la Universidad Católica de Chile, la Universidad de Concepción, la

¹⁴ Pedro Roth, «Posibilidad de las energías renovables no convencionales en Chile, su potencial y el registro de los recursos», *Centro de Investigación de Energías Renovables y del Ambiente* (Valparaíso: UTFSM, s/f).

¹⁵ Hirschmann, «Records on solar radiation...».

Universidad Técnica del Estado y la Universidad del Norte¹⁶. Los datos se enviaban al Laboratorio de Energía Solar en UTFSM, donde eran evaluados y procesados por un equipo de personas especialmente capacitadas, con procedimientos estandarizados, según establecía la Oficina Meteorológica Mundial. Finalmente, los resultados eran devueltos a las organizaciones de origen.

El primer artículo de Hirschmann informando medidas coordinadas de radiación solar de incidencia en Chile fue publicado en el *Solar Energy Journal*¹⁷. Esta publicación comparó las primeras mediciones realizadas por piranógrafos en el norte del país con las isopleas sobre la superficie terrestre establecidas por J.N. Black¹⁸. Más tarde, Hirschmann publicó su trabajo titulado «Registros de radiación solar en Chile»¹⁹, que incluye un resumen de publicaciones chilenas sobre el tema, donde llama la atención sobre el fenómeno del desplazamiento estacional de la radiación solar máxima en el continente sudamericano. Hirschmann menciona el trabajo de Sergio Cuevas Droguett publicado en la revista local *Scientia*, con mediciones de radiación solar registradas en 1962 en las zonas norte y centro de Chile²⁰. También se menciona el artículo publicado por César Caviedes sobre la radiación solar y las temperaturas en el centro del desierto del norte chileno²¹. Sin embargo, Hirschmann afirma que «el problema con estas primeras publicaciones chilenas es que tienen pocos resultados confiables en las mediciones de las radiaciones solares de incidencia (global)»²².

¹⁶ Hirschmann, «Records on solar radiation...».

¹⁷ Julio Hirschmann, «Present day state of investigation on the evaluation of solar energy sources in Chile», en *World Power Conference, Sixth Plenary Meeting* (Melbourne: 1962)..

¹⁸ J.N. Black, «The distribution of solar radiation over the earth's surface», *Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie* 7: 2 (1956): 165-189.

¹⁹ Hirschmann, «Records on solar radiation...».

²⁰ Sergio Cuevas, «Mediciones de radiación solar de la zona central y norte de Chile en 1962», *Scientia* 122 (1963): 5-32.

²¹ César Caviedes, «Radiación solar y temperatura en el núcleo del desierto norte de Chile», *Boletín de la Asociación de Geógrafos de Chile* 1: 1 (1967): 5-10.

²² Hirschmann, «Records on solar radiation...».

Los conjuntos de datos originales informados por Bocic²³, Hirschmann²⁴, Dobosi y Ulriksen²⁵ provenían básicamente de dos tipos de instrumentos utilizados para medir la radiación solar en Chile. La duración de la luz solar se obtuvo mediante los heliógrafos Campbell-Stokes y la radiación global se midió mediante los piranógrafos bimetálicos de Robitsch. Según Dobosi y Ulriksen, en 1965 había 14 estaciones en el país que tenían mediciones simultáneas de radiación global y duración de la luz solar, tres estaciones tenían solo mediciones de radiación global y las 25 restante tenían mediciones de duración de la luz solar solamente²⁶. Los datos de radiación cubrieron el período comprendido entre 1964 y 1966. Los datos disponibles sobre la duración del Sol se extendieron principalmente entre 1948 y 1957 y entre 1964 y 1966.

Hirschmann describió todas las estaciones disponibles que informaban al Archivo Solarimétrico Nacional en el período que va entre 1961 y 1970, desde Parinacota, en el norte de Chile, dirigida por Endesa, hasta tres estaciones ubicadas en la Antártica, administradas por la Oficina Meteorológica de Chile (Centro Meteorológico Antártico, Base Pedro Aguirre Cerda, Base Gabriel González Videla)²⁷. Un caso interesante fueron las grabaciones de Mataverí, Rapa Nui, tomadas por un antiguo instrumento de ordenadas no lineales. Para utilizar estos datos, el personal del Laboratorio de Energía Solar cambió los diagramas, uno por uno, a una escala lineal utilizando un integrador especialmente diseñado en la UTFSM. Un total de 81 estaciones estaban equipadas con heliógrafos durante este período y 54 de ellas también tenían piranógrafos. Solo dos de estas estaciones mantuvieron grabaciones continuas durante todo el período —10 años— para ambos instrumentos: Cerro Moreno en

²³ Víctor Bocic, *Antecedentes generales de la energía solar y su aprovechamiento*. Memoria para optar al título de ingeniero mecánico (Valparaíso: UTFSM, 1958).

²⁴ Hirschmann, «Present day state of investigation...».

²⁵ Z. Dobosi y P. Ulriksen, «Distribution of global radiation over Chile», *International Solar Energy Society Conference, Paper 3*: 106 (1970).

²⁶ Dobosi y Ulriksen, «Distribution of global radiation...».

²⁷ Hirschmann, «Records on solar radiation...».

Antofagasta y Quinta Normal en Santiago. El número de estaciones con datos disponibles de heliógrafos / piranógrafos comenzó con una proporción de 29/6 en 1961, alcanzó un máximo de 61/40 en 1965 y terminó con 55/30 en 1970.

En esta etapa, la UTFSM también realizó mediciones comparativas simultáneas con diferentes tipos de instrumentos para el registro de la radiación solar. Estos instrumentos fueron un piranógrafo bimetálico Robitsch-Fuess, un piranógrafo termopar Kipp con grabadora Kipp y un piranógrafo termopar Eppley con grabadora Dynmaster. Hirschman informó de pequeñas diferencias entre estos instrumentos, trazados en una escala común para un día determinado, presentando la función coseno como una expresión matemática para los procesos de energía solar²⁸. Con el objetivo de mejorar el contraste periódico o la comparación de diferentes equipos, German Frick construyó un pirheliómetro de su propio diseño.



::: Julio Hirschmann y piranógrafos.

Fuente: Laboratorio de Energía Solar UTFSM

²⁸ Julio Hirschmann, «The cosine function as a mathematical expression for the Processes of Solar Energy», *Solar Energy* 16 (1974): 117-124.



∴ Julio Hirschmann y piranógrafo de Frick.
Fuente: Laboratorio de Energía Solar UTFSM

Un desarrollo tecnológico interesante que se realizó en el Laboratorio de Energía Solar fue el diseño y construcción de dispositivos que siguen la trayectoria del Sol. El primer registro documentado —1962— corresponde a un mecanismo completamente mecánico reportado por Finster en la revista *Scientia* de la Universidad Técnica Federico Santa María²⁹. Un año más tarde, en 1963, Saavedra publicó su trabajo de memoria en la UTFSM, en el que presentó un servomecanismo de seguimiento dotado de control electrónico para

²⁹ Curt Finster, «El heliostato de la Universidad Santa María», *Scientia* 119: 5 (1962): 5-20.

registrar irradiación solar mediante un pirheliómetro Eppley³⁰. Veinte años después, en 1983, Maldonado diseñó y construyó un sistema de seguimiento solar controlado por un programa computacional que aseguraba orientación automática de un pirheliómetro³¹. Otros 20 años después apareció el reporte de un nuevo desarrollo denominado INTRA, publicado por Georgiev, con un diseño representativo de las nuevas generaciones de seguidores solares que combina control activo y pasivo, resolviendo problemas asociados a condiciones de encendido o de cielos nublados³².

En 1974 se adquirió un pirheliómetro de compensación Armstrong, que fue durante muchos años el instrumento estándar para las mediciones solarimétricas de Chile, ya que era el instrumento más preciso disponible en América Latina. En 1997 fue reemplazado por un radiómetro de cavidad adquirido por la Dirección Meteorológica de Chile. Posteriormente, cuando se incorporaron procedimientos modernos de cálculo, la información se registró en cintas magnéticas digitales y luego en disquetes.

Cuando el fondo gubernamental chileno para el desarrollo científico y tecnológico (Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico, Fondecyt) comenzó, en 1981, se presentaron varios proyectos para modernizar y mejorar los procedimientos de registro y presentación de datos solares y eólicos. Estos proyectos buscaban adaptar los procedimientos a las nuevas posibilidades de registro de datos, y proponían un procedimiento uniforme para que los resultados fueran compatibles con lo que se hizo en Europa y los Estados Unidos³³. Pedro Roth, de la Universidad Técnica Federico Santa

³⁰ A.S. Saavedra, *Diseño de un servomecanismo seguidor solar para un instrumento registrador de la irradiación solar directa*, memoria de título (Valparaíso: Universidad Técnica Federico Santa María, 1963).

³¹ J.A. Maldonado, *Diseño y construcción de un sistema de control automático para el posicionamiento de un Pirheliómetro*, memoria de título (Valparaíso: Universidad Técnica Federico Santa María, 1983).

³² A. Georgiev, P. Roth y A. Olivares, «Sun following system adjustment at the UTFSM», *Energy Conversion and Management* 45 (2004): 1795-1806.

³³ Roth, «Posibilidad de las energías renovables...».

María, realizó dos proyectos titulados «Registro y presentación de datos solares y eólicos»³⁴.



∴ Salas del Archivo Nacional de Data Solarimétrica y equipos.
Fuente: Laboratorio de Energía Solar UTFSM

En la década de 1970, la actividad del Laboratorio se dividía en investigación básica y en algunas aplicaciones de la radiación solar. Las líneas de trabajo de carácter teórico, más asociadas a registros y mediciones solares, se pueden clasificar fundamentalmente en cuatro³⁵: evaluación de recursos de energía solar en Chile, inercia térmica y su influencia en plantas de destilación solar, desplazamiento del máximo de radiación solar en América del Sur y búsqueda de algún índice de correlación entre ciclos de manchas solares o ciclos lunares y la distribución de las lluvias en Chile.

En noviembre 1988, el profesor Dr. Ing. Pedro Roth asumió como jefe del Laboratorio de Energía Solar. En ese entonces se contaba con información de 89 estaciones con piranógrafos y 113 con heliógrafos a lo largo del país. Se tomó la decisión de trasladar la investigación de colectores solares a la sede de Viña de Mar, ubicada

³⁴ Estos fueron los proyectos Fondecyt 0019 y Fondecyt 476/82.

³⁵ Gabriel Osorio, *Laboratorio de Energía Solar de la UTFSM de Valparaíso*, Archivo Repositorio Conicyt, 1972.

en una zona con mejores condiciones de radiación solar. Los instrumentos de medición de irradiancia solar y el Archivo Nacional quedaron en la Torre del Edificio A de la UTFSM y el laboratorio cambió de nombre a Laboratorio de Evaluación Solar (LES). En 1991, en conjunto con el profesor Luis Da Silva del Departamento de Física, comenzaron a realizar las primeras mediciones sistemáticas de ozono y radiación ultravioleta. Se implementaron tarjetas adquisidoras de datos y, en 1999, se adquirió una estación de monitoreo automática Estación Campbell, que generaba y almacenaba automáticamente diversos parámetros meteorológicos cada 10 minutos. Ese mismo año, el Laboratorio abrió una página web que entrega información en tiempo real al público interesado.

Tras Julio Hirschmann, los directores del Laboratorio Solar fueron los profesores Bernardo Seifer, Julio Gómez, Adolfo Arata, Pedro Sarmiento, Pedro Roth y Alejandro Sáez.

TESTIMONIO

Miriam Roth

«Sol de verano en la UTFSM»

Era verano, habíamos cumplido con nuestro primer año en la universidad y si no fuera por ese ramo, ese típico y temido ramo de Cálculo, hubiese sido un año perfecto. Dado que me atrasaría en la carrera si no lo tenía aprobado, decidí tomarlo en el semestre de verano. Cuando todos iban en dirección al norte, a las playas, yo iba al sur, en dirección a la universidad. Para aprovechar el viaje y juntar dinero para luego salir de vacaciones, postulé a un trabajo que ofrecía el Departamento de Mecánica en el Laboratorio de Evaluación Solar. Llegué junto a otro estudiante, después de subir las interminables escaleras de la majestuosa Torre del Edificio A para encontrarme con los señores Roberto Sota y Rafael Bolocco. Después de una minuciosa introducción a lo que se hacía en el Laboratorio y una visita a la azotea donde se encontraban los instrumentos (con una espectacular vista sobre la bahía de Valparaíso), llegamos a conocer las cajas y cajas y cajas... de datos solarimétricos que llegaban

desde todo Chile para ser evaluadas, analizadas y guardadas en el Archivo Nacional Solarimétrico, ubicado allí.

Estuvimos ocho semanas evaluando bandas de heliógrafos y gráficos del piranógrafo.

El heliógrafo es un instrumento que consta de una esfera de vidrio que concentra la radiación solar directa. Produce marcas al quemar una banda de papel ubicada al costado opuesto de la radiación. Estas bandas, que son cambiadas cada día, tienen una escala que facilitan la determinación del tiempo que el Sol tuvo la intensidad para quemar el papel. Nuestra tarea era ir sumando los intervalos de tiempo marcados en el papel y determinar las horas de Sol que hubo al día.

El piranógrafo es un instrumento activo que detecta la irradiación global (directa y difusa) mediante una celda fotosensible. Se protege de convección y polvo mediante una cúpula de vidrio. El sensor emite una corriente que mueve una aguja con tinta. Esta va dibujando una curva sobre un rollo de papel que, al girar, lentamente, va creando el gráfico en función de las horas del día. Al integrar el área bajo la curva de aquel gráfico para cada día del año, se obtiene la irradiación solar global para la ubicación evaluada.

Los gráficos para evaluar eran semanales, es decir se observaban siete curvas interrumpidas por una línea de valor cero, producido por las horas nocturnas. Las curvas debían ser seguidas mediante un sistema que calculaba el área bajo la curva, valor que debía ser registrado para cada día.

Los recuerdos de este trabajo de verano fueron la meticulosidad y dedicación de las personas encargadas del archivo para realizar la evaluación de esa gran cantidad de mediciones. Hoy me impresiona la evolución en el tema de la toma de mediciones, la adquisición y evaluación de datos: cómo el proceso ha avanzado, cuánta información podemos captar, evaluar y almacenar en forma instantánea, es decir, en tiempo real.

Ese verano mi visión del Sol fue desde un punto de vista muy diferente a otros estudiantes, pero muy enriquecedor.

Mis más sinceros agradecimientos a los señores Roberto Sota y Rafael Bolocco.

2.3 Medición y registro solar en la actualidad (2004-2016)

Existen tres bases de datos públicas con información sobre radiación solar en Chile. Como se mencionó anteriormente, el Archivo Solarimétrico Nacional recolectó datos sobre 89 estaciones entre 1961 y 1983, cuya información ha sido puesta a disposición por Pedro Sarmiento³⁶. Entre otros, se pueden encontrar varias publicaciones de proyectos de último año de estudios en la UTFSM³⁷ y el informe resumido «La irradiancia solar en los territorios de la República de Chile»³⁸. Hay reclamos de discrepancias entre el Archivo y otras fuentes de información. Según Ortega, «los datos del Archivo podrían tener incertidumbres tan altas como el 15% asociadas al período de medición, más la incertidumbre inherente al uso de actinógrafos (piranografías)»³⁹. Estas afirmaciones no se han probado, pero el argumento ha sido útil para justificar nuevos fondos para campañas de medición modernas.

Desde enero de 1988, la Dirección Meteorológica de Chile maneja varios piranómetros ubicados en 18 estaciones meteorológicas a lo largo del país. Sin embargo, la mitad de ellos fueron retirados de servicio entre 2001 y 2005, debido a sus costos de mantenimiento, dejando solo nueve estaciones operativas, disponibles en el sitio web, hasta 2010, cuando la medición global se informó en una superficie horizontal. Los datos se tomaban en intervalos de 10

³⁶ Pedro Sarmiento, *Energía solar: aplicaciones e ingeniería* (Valparaíso: Ediciones Universitarias de Valparaíso, 1995).

³⁷ Alfredo Cáceres, Proyecto de un sistema de calefacción solar para el Laboratorio de Electrónica de la Sede J.M.C. de la Universidad Santa María, memoria para optar al título de ingeniero mecánico (Valparaíso: UTFSM, 1984); J. Lira, Preparación de tablas de radiación solar en diferentes planos para algunas localidades típicas del país y sus consecuencias en el diseño arquitectónico, memoria para optar al título de ingeniero mecánico (Valparaíso: UTFSM, 1986); C. Guajardo, Preparación de mapas de radiación solar para la República de Chile, memoria para optar al título de ingeniero mecánico (Valparaíso: UTFSM, 1999).

³⁸ UTFSM, CNE y PNUD, *Irradiancia solar en territorios de la República de Chile*, Santiago, 2008, en http://www.plataformacaldera.cl/biblioteca/589/articulos-64683_documento.pdf

³⁹ R. Ortega et al., «The estate of solar energy resource assessment in Chile», *Renewable Energy* 5 (2010): 2514-2524.

minutos, presentados como irradiación integrada por hora (Wh/m^2) y se pueden solicitar en www.meteochile.cl a una tarifa baja que cubre los costos de procesamiento.

La Agencia de Cooperación Alemana (GTZ), junto con la Comisión Nacional de Energía (CNE), iniciaron una campaña de medición en 2008, cuyo objetivo era proporcionar al público general un acceso integrado y cómodo a los datos obtenidos hasta la fecha, provenientes de una red de tres estaciones ubicadas en Pozo Almonte, San Pedro de Atacama y Crucero, en el desierto de Atacama⁴⁰. La campaña de medición comprendió una encuesta de energía eólica y solar en un área amplia para comprender mejor las características de estos recursos en el país; no pretendía ofrecer precisión científica, sino datos confiables, consistentes y comparables. Muchas de las estaciones instaladas por GTZ han dejado de funcionar. En el caso del viento, hay estaciones de la Dirección Meteorológica de Chile y las estaciones instaladas por GTZ informan mediciones de recursos eólicos, que no tienen acceso en línea. La única estación pública de precisión en Chile está instalada en María Elena y ha estado operativa desde 2012. Esta estación, llamada Crucero II, es la única que registra la radiación normal directa (DNI).

Más recientemente se han realizado dos esfuerzos en la estimación de la radiación solar a partir de imágenes de satélite geostacionario en Chile. El primero es el Explorador Solar (del Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile), que presenta la estimación de los recursos solares en Chile. Estos datos se han generado a partir de modelos atmosféricos y datos satelitales para el período comprendido entre 2004 y 2016, a una resolución horizontal de 90 m sobre Chile continental. Sus resultados se han validado utilizando 140 irradiancias solares de superficie en todo el país⁴¹. Aunque el Explorador Solar no proporciona una estimación en tiempo real de la radiación solar, uno de los grandes valores que tiene es que es una

⁴⁰ Disponible en <http://walker.dgf.uchile.cl/Mediciones/>

⁴¹ Alejandra Molina, Mark Falvey y Roberto Rondanelli, «A Solar Radiation Database...».

herramienta que está disponible en línea y permite a los usuarios estimar el año meteorológico tipo para cada punto en el país.

La segunda iniciativa es el modelo Chile-SR, desarrollado por la Pontificia Universidad Católica de Chile, especialmente adecuado para las condiciones de Chile al incluir datos actualizados del clima corregidos por la altitud (temperatura, humedad relativa y presión atmosférica), topografía y albedo de superficie⁴². Los datos de salida del modelo Chile-SR se componen de radiación horizontal global y radiación horizontal directa por hora.

CONCLUSIONES

Cada vez son más las disciplinas que utilizan datos de radiación solar para modelar o pronosticar parámetros. Por ejemplo, la meteorología usa esta información para el pronóstico del clima, la ingeniería utiliza los datos para el cálculo de la conversión de energía solar en calor o electricidad, el área de la salud trabaja con datos de radiación para la determinación del nivel de radiación UV dañina para ojos y piel, la arquitectura aplica la información solar para elaborar simulaciones térmicas y lumínicas en edificios y la química para utilizar la radiación en diferentes procesos de degradación de productos, entre otros.

Contar con datos medidos de irradiancia solar es clave para poder apoyar la investigación y llevar adelante el desarrollo de nuevas tecnologías solares. Igualmente, si se piensa en la industria solar, para proteger a productores y usuarios de tecnologías solares es necesario medir las mismas variables con similar calidad, siguiendo las especificaciones técnicas para calcular, por ejemplo, la eficiencia esperada.

Por esta razón, se han elaborado normas que permiten utilizar y comparar las mediciones, o bien reconocer las diferencias entre distintos métodos de medición. La Organización Mundial de Estandarización (ISO, por sus iniciales en inglés) es la encargada de elaborar

⁴² Rodrigo Escobar, *et al.*, «Estimating the potential for solar energy utilization in Chile by satellite-derived data and ground station measurements», *Solar Energy* 121 (2015): 139-151.

normas guía para los países integrantes de esta red de organismos nacionales de medición. Chile es miembro de ISO a través del Instituto Nacional de Normalización (INN) y, por lo tanto, aplica normas como ISO 9060⁴³, que estandariza los métodos e instrumentos de medición y que especifica y clasifica los requerimientos y cualidades de los radiómetros solares, según rangos de precisión y aplicaciones.

En general, la medición es una técnica que presenta grandes cambios a través del tiempo. Actualmente es posible recolectar una gran cantidad de datos, con mayor precisión y exactitud, de manera automática; así, diferentes parámetros solares pueden ser evaluados casi en tiempo real para cualquier ubicación del mundo. Este capítulo busca mostrar las diferencias históricas en esta área y las consideraciones que son necesarias cuando se comparan datos a lo largo de la historia, tanto medidos como modelados, desde los comienzos de las mediciones en Chile.

Tal como se ha descrito, en la actualidad se continúan realizando esfuerzos para medir y registrar la radiación solar en Chile. Sin embargo, es preciso recordar que estas actividades tienen una trayectoria histórica. Tanto la experiencia del Instituto Smithsonian y del Observatorio Montezuma, como aquella del Archivo Nacional Solarimétrico, se vinculan con la generación de investigación en torno a radiación solar en Chile. Si bien las tecnologías y los procedimientos para la obtención de aquellos registros pueden haber cambiado, el interés por comprender cómo se comporta la radiación solar ha estado presente desde hace décadas. Observar aquella historia, sin duda, permite instalar las capacidades en los registros solares de Chile con un entusiasmo y una densidad distinta.

⁴³ <https://www.iso.org/standard/67464.html>

CAPÍTULO 4

TECNOLOGÍAS DE TRANSFORMACIÓN DE ENERGÍA SOLAR Y ALGUNAS APLICACIONES

Miriam Roth^{*}, *Pedro Sarmiento*^{**} y *Cecilia Ibarra*^{***}

I. INTRODUCCIÓN

La cantidad de energía solar que irradia la superficie terrestre al año es, aproximadamente, 10.000 veces mayor al actual consumo energético total anual de los seres humanos¹. En otras palabras, la energía que llega a nuestro planeta en una sola hora cubriría el consumo energético de todo un año.

Tener a disposición ese enorme potencial energético ha llevado al desarrollo de un amplio rango de tecnologías para transformar la energía del Sol en energía útil para el ser humano. Sin embargo, hechos históricos, como la crisis de petróleo en los años setenta, o la crisis climática actual, han dado especial impulso a su desarrollo. Estas tecnologías, y sus diversas aplicaciones, comienzan desde lo más simple y sin conversión energética: es el caso de la iluminación de recintos mediante superficies transparentes. Existen

^{*} Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Técnica Federico Santa María.

^{**} Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Técnica Federico Santa María.

^{***} Centro de las Ciencias del Clima y la Resiliencia (CR2), Universidad de Chile.

¹ Eurec Agency / Eurosolar, *WIP: Power for the World. A Common Concept*. IEA (World Energy Outlook, 2009).

también aplicaciones que implican el calentamiento de aire o agua a temperaturas relativamente bajas (entre 25°C y 60°C) para su uso como agua caliente sanitaria (ACS) o para calefaccionar recintos. Por otra parte, se conocen la refrigeración solar, que forma un ciclo termodinámico con equipos de compresión y expansión; también la generación de energía eléctrica ya sea con sistemas fotovoltaicos (PV) o en centrales térmicas que trabajan a temperaturas alrededor de los 1000°C, con apoyo de sistemas de concentración de la radiación. Además, mediante sistemas de concentración mayores es posible alcanzar temperaturas de alrededor de 3000°C para utilizar en reactores u hornos solares.

Por lo tanto, si bien la radiación solar no se distribuye por igual en todas las regiones del mundo, todos los países pueden, de una u otra forma, aprovecharla para disminuir el uso de combustibles fósiles y, con ello, el impacto ambiental que estos producen.

En Chile, los grupos de trabajo en energía solar se organizaron preferentemente en las universidades durante la segunda mitad del siglo xx. Entre ellos, el Laboratorio Solar de la Universidad Técnica Federico Santa María (UTFSM) destacó por sus actividades, tanto en la medición de radiación solar como en investigación y desarrollo de tecnologías solares. En la década de 1950, el rector Francisco Cereceda propuso que la universidad se involucrase en el desarrollo energético del país. Para ello, encomendó al profesor Julio Hirschmann la misión de examinar alternativas energéticas. La conclusión de la búsqueda de Hirschmann fue que la energía solar presentaba el mejor futuro para Chile y comenzó por divulgar las oportunidades de desarrollar tecnología solar traduciendo un artículo sobre el estado del arte de las aplicaciones para uso doméstico e industrial, que publicó en la revista científica de la universidad². El profesor Hirschman fundó el Laboratorio de Energía Solar de la UTFSM en 1960. Desde entonces, se mantiene como una unidad de investigación, desarrollo tecnológico y docencia del Departamento de Ingeniería Mecánica. En 2013 amplió sus actividades y se convirtió

² Julio Hirschmann, «Sobre las posibilidades de aprovechar la energía geotérmica en Chile», *Scientia*, 21: 1 (1954): 25-43.

en el Laboratorio de Energías Renovables (LER). En ese marco se han desarrollado numerosos trabajos de tesis, las que a su vez ilustran las aplicaciones tecnológicas que aquí presentamos.

Este capítulo se organiza en torno a las diferentes tecnologías de transformación de la energía solar y sus múltiples usos finales. Se presenta una clasificación por tecnología, una breve descripción, las principales características de cada una, sus aplicaciones típicas y algunos ejemplos de estudios desarrollados en la UTFSM.

Además, se analizan los trabajos de tesis relacionados a la energía solar que se han hecho en la universidad durante los últimos 60 años, pues en parte reflejan los intereses de investigación y docencia a lo largo de la historia. La clasificación propuesta y las descripciones de las tecnologías se basan en el informe sobre energías renovables del Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)³ del año 2011.

2. TIPOS DE TECNOLOGÍAS DE TRANSFORMACIÓN DE ENERGÍA SOLAR

Las aplicaciones más importantes de la energía solar se vinculan con el uso pasivo del Sol en arquitectura, el aprovechamiento del calor por él generado, la generación de energía eléctrica y la producción de combustibles a partir de energía solar.

El uso pasivo de la energía solar se aplica mayormente para generar o mantener condiciones de comodidad térmica y lumínica en viviendas o edificios. La destilación solar y los invernaderos o secadores de frutas u hortalizas son aplicaciones típicas en la ingeniería solar. En general, esta tecnología no usa equipos auxiliares como bombas, compresores o ventiladores.

La conversión de energía solar en calor (*energía térmica*) es bastante conocida. Ella se basa en el efecto de la absorción de energía por un objeto expuesto al Sol y su consecuente aumento de temperatura. El desafío del uso de esta tecnología actualmente se enfoca en maximizar tal absorción, evitar fugas (pérdidas de calor)

³ O. Edenhofer et al. (eds.), *Intergovernmental Panel on Climate Change* (Cambridge: Cambridge University Press, 2011).

y transportar la energía térmica a los lugares de uso, ya sea para calefaccionar, precalentar, secar, generar vapor, u otros. En esta área se han desarrollado estudios específicos en colectores con espacios cuasi vacíos para minimizar la convección, espejos para concentrar la radiación o superficies absorbentes especiales para maximizar la absorción, entre otras. Qué técnica y accesorios se aplican, dependerá del rango de temperatura necesitado, el que varía desde 25°C, para el temperado de recintos o secadores de fruta, hasta temperaturas de aproximadamente 3000°C en hornos solares con concentración en un punto focal de radiación solar mediante espejos.

La *refrigeración* también puede usar energía solar como fuente térmica de calor que, acoplada a una bomba de calor, puede producir un cambio de flujo de energía mediante un sistema termodinámico.

La generación de *energía eléctrica solar* se produce mediante dos tipos de tecnologías que se basan en principios diferentes. La primera es la generación fotovoltaica, en la que la energía de la radiación solar se convierte directamente en electricidad en una fotocelda. La segunda es la generación de vapor mediante energía térmica producida por la concentración de la radiación solar. El vapor generado pasa luego a través de una turbina de vapor convencional, acoplada a un generador eléctrico para producir electricidad (centrales solares).

La producción de *combustibles solares* es quizás la tecnología más reciente, aún en proceso de investigación y desarrollo activo. Varios países ya han comenzado a construir las primeras plantas comerciales, en la que se destaca la producción de hidrógeno o singas con ayuda de energía solar.

Una clasificación general de las tecnologías de transformación de energía solar, que se encuentra en la literatura de manera reiterada y las siglas que se usan en inglés, es la siguiente:

1. sistemas fotovoltaicos (PV),
2. energía solar pasiva (PAS),
3. energía solar activa (ACT),
4. centrales solares (CSP) y
5. combustibles solares (FUEL).

Los grandes desafíos en torno a las tecnologías solares son el transporte de energía al centro de consumo y su almacenamiento, para períodos en que el Sol no irradia. Actualmente, los factores de espacio y tiempo son las grandes desventajas con respecto a las energías fósiles.

Los combustibles solares brindan una solución al transporte de energía y a la diversificación de su uso; por su parte, el sistema de acumulación depende de la transformación de energía. Algunos acumuladores son: las baterías para almacenar energía eléctrica como energía química, centrales de bombeo para almacenar energía eléctrica en forma de energía potencial, masas térmicas (como el muro Trombe en arquitectura) o el subsuelo para almacenar energía térmica.

3. TRABAJOS DE TÍTULO Y GRADO EN ENERGÍA SOLAR EN LA UTFSM

Para estudiar el desarrollo de la investigación en energía solar en una perspectiva histórica, recuperamos y analizamos los trabajos de título y grado en energía solar en la UTFSM. A través de estos trabajos es posible observar los intereses nacionales sobre el desarrollo y la integración de las tecnologías solares, así como la relación de la historia de la energía solar en Chile con las distintas tecnologías mundiales al respecto. La base de datos contempla 60 años de trabajos de tesis, desde el año 1958 hasta el 2018.

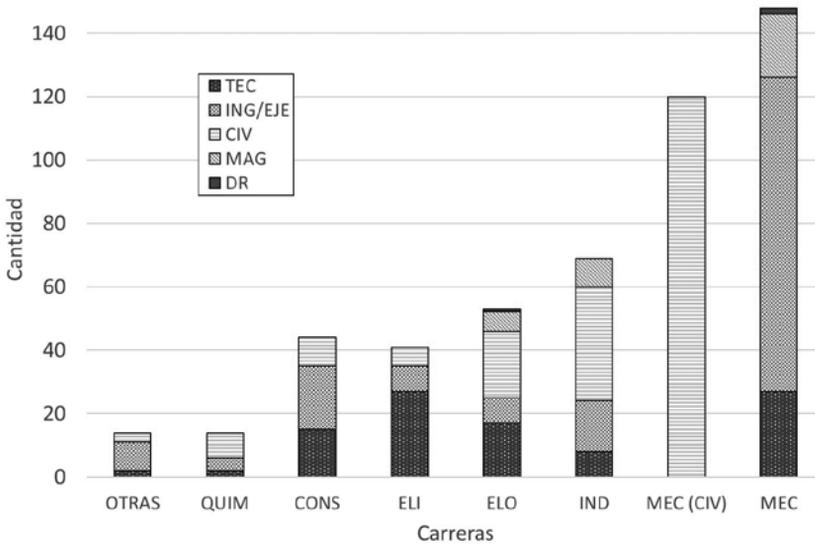
Las cinco categorías de las tecnologías de transformación de energía solar, nombradas anteriormente (PAV, PAS, ACT, CSP y FUEL), han sido utilizadas para clasificar estos trabajos.

Se encontró un universo de 535 trabajos de tesis que se relacionan con energía solar, las cuales se dividen según el nivel de profesionales, entre técnicos, ingenieros (ejecución y civil), magíster y doctores. Al observar este tipo de trabajos, se puede reconstruir parte de la historia de la investigación, desarrollo tecnológico e innovación en torno a la energía solar en el país. Uno de los aspectos que destacamos es que, no solo se investigó en la tecnología en sí, sino que también se estudió su implementación, considerando geografía,

desafíos sociales, políticas de gobierno y economía, etcétera. Por ello encontramos varios trabajos de otras especialidades de la ingeniería, además de ingeniería mecánica y eléctrica.

En la figura 4.1 se aprecia la distribución de las tesis según carrera y nivel de estudio. La mayoría de los trabajos se desarrolló en el Departamento de Mecánica, que agrupa más de 260 ejemplares, de los cuales solo 120 corresponden a Ingeniería Civil Mecánica. Sin embargo, varias otras disciplinas, como Ingeniería Industrial, Electrónica, Electricidad, Construcción, Química, Arquitectura, etcétera, realizaron trabajos relacionados con la energía solar. Varios de ellos se hicieron entre diferentes disciplinas o departamentos, e incluso con otras universidades.

FIGURA 1. CANTIDAD DE TRABAJOS SEGÚN NIVEL DEL PROFESIONAL TITULADO

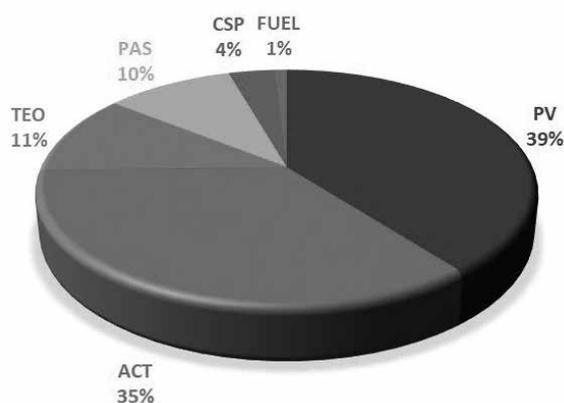


Fuente: elaboración propia⁴

⁴ De izquierda a derecha: «Otras» corresponden a ingeniería informática, ambiental, arquitectura y comercial; QUIM: química; CONS: construcción civil; ELI: eléctrica; ELO: electrónica; IND: industrial y MEC: mecánica.

Del total de las tesis desarrolladas en el área solar, un 11% corresponde al área de los estudios teóricos y generales de la energía solar (TEO), como se aprecia en la figura 4.2. La mayoría de estos se relaciona con los métodos de medición de radiación y desarrollo de seguidores solares. Así también se encuentran mapas y estudios sobre la intensidad de la radiación solar sobre el territorio nacional y los procedimientos adecuados para realizar las diferentes mediciones solares.

FIGURA 2. TESIS UTFSM EN ENERGÍA SOLAR



Fuente: elaboración propia⁵

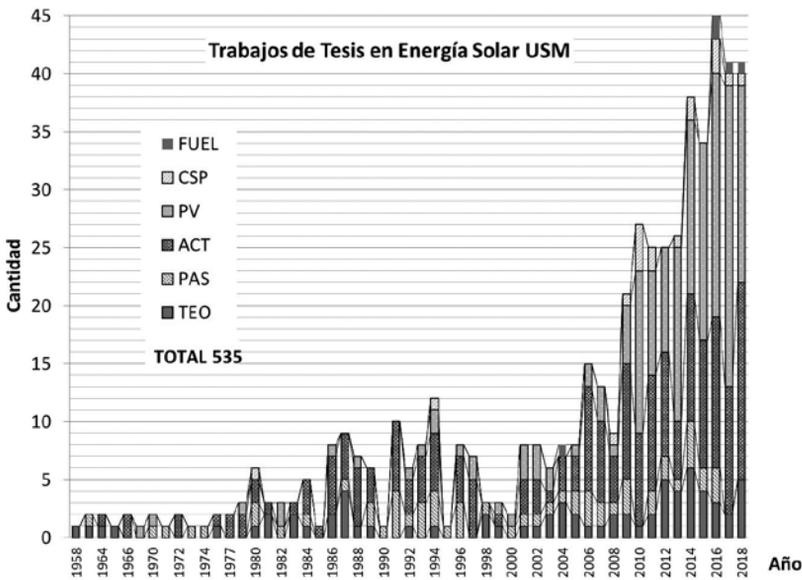
El área más estudiada en los trabajos de tesis de la UTFSM es la energía fotovoltaica (PV) que corresponde a un 39% del total. También destacan los estudios de la tecnología térmica activa (35%), en las que se estudia el uso de energía solar térmica por medio de colectores solares. Aquí se distinguen tres grandes temas: tecnología de los colectores, métodos de almacenamiento de energía y aplicaciones. Además, seis trabajos de esta área se relacionan con la refrigeración solar.

⁵ PV: fotovoltaica, ACT: energía solar activa, TEO: estudios teóricos y conceptuales sobre energía solar, PAS: tecnología solar pasiva, CSP: concentradores solares de potencia y FUEL: combustibles solares.

El uso de la energía solar térmica pasiva (10%) ha tenido una importancia constante a lo largo del tiempo. En ella destacan los estudios sobre aplicaciones en desalinización, invernaderos y arquitectura (en la que se incluye el comportamiento de masas térmicas). Varias de estas aplicaciones evolucionan al tipo de tecnología «activa» al ser apoyadas con equipos mecánicos para aumentar eficiencia o capacidades, como es el caso de la desalinización en varias etapas, que hace circular el agua mediante una bomba hidráulica.

En los años ochenta aparecen trabajos sobre la concentración de la energía solar a altas temperaturas para fines de generación de electricidad (CSP), sin embargo, el gran aumento de trabajos en esta área se aprecia desde el año 2008 (ver figura 4.3). Además, en el área de combustibles solares (FUEL) cabe destacar la presencia de algunos estudios ya en el año 2004 y el aumento de ellos en los últimos tres.

FIGURA 3. TRABAJOS DE TESIS EN ENERGÍA SOLAR UTFSM



Fuente: elaboración propia

Como se observa en el gráfico de la figura 4.3, en los últimos años la realización de tesis sobre energía solar ha experimentado un crecimiento exponencial.

4. GENERACIÓN ELÉCTRICA FOTOVOLTAICA (PV)

4.1 *Características y desarrollo de la PV*

La conversión directa de energía solar en energía eléctrica por celdas solares se basa en el principio fotovoltaico, que se conoce desde fines del siglo XI. Este se puede definir, en forma simple, como la aparición de una diferencia de potencial (voltaje) entre terminales de un material semiconductor, como el silicio, cuando este es iluminado, es decir, cuando es impactado por fotones. Cuando se conecta la celda, irradiada por una fuente lumínica —en este caso, el Sol— a una carga, circula corriente (I). Por ende, la potencia eléctrica se determina mediante el voltaje y la corriente (continua) y es proporcional a la radiación solar recibida por la celda. La tensión de una celda de silicio típica varía entre 0,4 a 0,6 V.

La eficiencia de la conversión de energía de una celda se define como el cociente entre la máxima potencia eléctrica que se puede entregar y la irradiancia incidente sobre la celda, que, a su vez, es el producto de la radiación solar incidente por el área de la celda.

Un panel o módulo solar se conoce como una agrupación de celdas que se conectan en serie para llegar al voltaje de salida de 12V, 24V, etcétera, y, en paralelo, para aumentar la corriente. La corriente máxima dependerá del tamaño del área de la celda. En usos comerciales, actualmente puede ser entre 1A a 5A. La eficiencia de conversión máxima de un panel depende de las propiedades del material de absorción empleado y de la tecnología del dispositivo. En el caso del silicio y otros materiales hoy utilizados, la conversión disminuye con la temperatura de la celda. Lo anterior significa que, si la celda aumenta de temperatura, su eficiencia baja, por lo que uno de los desafíos actuales es reducir la temperatura de las celdas expuestas al Sol.

Para incrementar la energía que un panel convierte, o bien su eficiencia, se ha trabajado en varios aspectos: seguir la trayectoria del Sol con el fin de captar la radiación normal (perpendicular) a la superficie del panel; concentrar la radiación mediante lentes, con lo que se necesita menos superficie para igual potencia; y mejorar el espectro absorbido por la celda mediante la unión de materiales con diferentes rangos de frecuencias de captación. Esto disminuye la temperatura del panel, dado que actualmente la energía absorbida por un material, sobre ciertas longitudes de onda, se convierte en calor.

Las tecnologías fotovoltaicas (PV) se pueden clasificar en cuatro grupos:

- a. Celdas PV de silicio (mono y policristalino), también llamadas *de primera generación*.
- b. Celdas de película fina (*thin film*), también llamadas *de segunda generación*.
- c. Celdas multiunión.
- d. Tecnologías PV emergentes.

Las tecnologías que actualmente se encuentran en forma masiva en el comercio son paneles PV de silicio monocristalino, policristalinos y amorfos (*thin film*). Los dos primeros abarcan aproximadamente 80% de las aplicaciones terrestres. En las tecnologías emergentes se encuentran las celdas de compuestos de los elementos químicos de los grupos III-V de la tabla de elementos químicos y las celdas orgánicas (polímeros).

A continuación, describimos brevemente cada tecnología, sus ventajas, desventajas y aplicaciones típicas.

a) Celdas de silicio (c-Si) (mono y policristalinas)

Las celdas más utilizadas actualmente son en base a silicio. Estas utilizan arena sílice como material base, que se encuentra en forma natural y abundante en la corteza de la Tierra. Sin embargo, el proceso de producción del silicio semiconductor es bastante costoso, debido a sus cuatro procesos: purificación de la arena para obtener

el material, fabricación de los monocristales, corte en láminas finas y fabricación de la celda solar.

El rendimiento de estas celdas comerciales se encuentra entre 12 y 14% para las policristalinas y 14 y 20 % para las monocristalinas. En un contexto de laboratorio se han medido eficiencias de hasta 25% para celdas de uniones simples de silicio monocristalino y 20,3% para el caso de celdas policristalinas. El valor máximo de eficiencia teóricamente calculado es de un 31% (Shockley-Queisser).

El gran avance de esta tecnología ha generado una reducción exponencial en los costos de producción desde inicios de los años ochenta. Esto se explica en parte por la bajada en el costo del proceso productivo y en la disminución de material utilizado en las láminas, las que han bajado su grosor de 200 μm a 150 μm .

Con el fin de aumentar la eficiencia de las celdas, se han aplicado diversas técnicas como, por ejemplo, la unión heterogénea (c-Si), que consiste en aplicar dos capas delgadas de silicio amorfo (5nm) sobre la superficie de la celda, mejorando la eficiencia a 23% y logrando un menor coeficiente de temperatura. Si bien la eficiencia de las celdas solares de c-Si convencionales disminuye a medida que aumenta su temperatura a una tasa de -0,45% / °C, las celdas de unión heterogénea muestran una tasa más baja de -0,25% / °C.

Otra tecnología para aumentar la eficiencia son las celdas IBC, en las que tanto la base como el emisor se conectan en la parte posterior de la celda, lo que implica que no hay sombra en su parte frontal. La mayor eficiencia de una oblea de silicio de contacto posterior es de 24,2%.

b) Celdas de lámina fina (thin film PV)

Esta tecnología se obtiene por deposición de películas de 1 μm de espesor de silicio con una estructura amorfa (no cristalina), u otro material semiconductor, sobre una base inerte, que puede ser vidrio, cerámica o metal y con la cual se disminuye considerablemente el costo del material semiconductor. La eficiencia actual para celdas comerciales no sobrepasa el 10%. Sin embargo, la flexibilidad, robustez y el bajo costo han contribuido a que esta tecnología sea la

más difundida para aplicaciones en arquitectura y en productos de uso común (calculadoras, cargadores, relojes, etcétera).

Otros materiales para celdas de lámina fina, que han demostrado mejores rendimientos que el silicio amorfo (a-Si), son a base de cobre, indio y selenio (CIS), los a base de cadmio y telurio (CdTe) y en base a cobre, indio, galio y selenio (CIGS). Estos últimos presentan las mayores eficiencias, con un 20,7%, pero están aún en etapa de estudio; los materiales comercialmente disponibles tienen eficiencias de un 13%. Se observa un gran crecimiento de este tipo de tecnología sobre todo en edificaciones, por su transparencia, colores y estructura, y no es casual que hayan surgido con las nuevas normas de eficiencia energética en varios países desarrollados.

Sin embargo, estos materiales presentan algunos problemas: por ejemplo, el indio es un material escaso; el silicio amorfo se ve afectado por un efecto de degradación que se ha podido estabilizar, pero no evitar, y sus rendimientos son bajos. La gran ventaja de la tecnología de lámina fina es su bajo costo, y su reducida masa, apropiada para paneles sobre materiales ligeros o flexibles, incluso textiles.

c) Celda multiunión (tándem / multijunction)

Este tipo de tecnología es la que más se utiliza hoy en el espacio exterior, debido a su alta eficiencia (aproximadamente 40%), aunque tiene un costo muy alto. Consta de una serie de capas de diferentes materiales absorbentes que producen una conversión más amplia del rango espectral de la radiación solar; de hecho, las primeras capas deben ser transparentes a los fotones. Se basa en elementos de la tercera a la quinta columna de la tabla periódica, como arseniuro de galio (GaAs), (GaInP) y otros. Por su alto costo, en la Tierra solo se están utilizando en centrales concentradoras fotovoltaicas (CPV). En estas hay lentes que focalizan la radiación sobre los paneles para obtener mayor energía primaria. Una de las celdas más estudiadas es la triple unión de GaInP / GaAs / Germanium con eficiencia récord de un 41,6%. Otra ventaja es que, al absorber mayor energía, esta no calienta la celda, por lo que tienen mayores eficiencias incluso a temperaturas altas.

Los sistemas concentradores solo funcionan con radiación solar directa, por lo que este tipo de centrales debiese ser instalado en regiones de alta radiación, baja nubosidad y con seguidores solares.

Estas celdas abarcan el 90% de las aplicaciones en el espacio y solo el 10% en la Tierra.

d) Tecnologías emergentes

Se trata de tecnologías que aún están en proceso de investigación y, en general, los esfuerzos en el estudio se enfocan a aumentar eficiencias y reducir el costo de la celda pv, ya sea al bajar el costo de los materiales del proceso de producción.

- Celdas orgánicas - *Organic cell* (OPV)

Una de las tecnologías emergentes ha sido la investigación y desarrollo de celdas hechas de materiales orgánicos. Las uniones de carbono en la estructura química de estos materiales tienen características semiconductoras, por ejemplo, en polímeros. Su eficiencia en laboratorio está muy por debajo de las otras tecnologías (aproximadamente 12%). Sus ventajas radican en la facilidad y flexibilidad de producir este tipo de celdas: la tecnología de producción es más económica, por ende, el precio de la celda es menor; tienen alta ganancia de energía eléctrica debido a extensas superficies; mayor flexibilidad, transparencia y mejores propiedades mecánicas. Son también ambientalmente amigables, por usar plásticos a base de carbonos, y ofrecen ventajas para su uso en arquitectura, porque se pueden producir celdas de diversos colores.

- Celdas de pigmento fotosensible (Celda de Grätzel / DSSCs)

La celda de pigmento fotosensible, celda de Graetzel o, en inglés, *dye-sensitized solar cell* (DSSC), se basa en un principio de la bioquímica, por lo que también se le llama celda electroquímica. Esta celda utiliza pigmentos orgánicos para la absorción de la luz como, por ejemplo, clorofila. Está compuesta de dos electrodos planos (vidrio) separadas a una distancia de 20µm a 40µm. En su parte interior están revestidas de una capa conductora eléctrica transparente. En

el electrodo que genera los electrones se tiene una capa de aproximadamente 10 μm de dióxido de titanio (TiO_2), y sobre esta una capa delgada de pigmento fotosensible. En el electrodo contrario se encuentra una capa catalítica (por ejemplo, platino) y, entre las capas, una solución conductora.

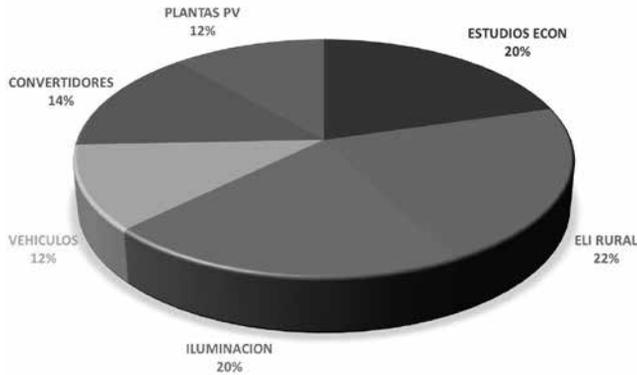
El principio de funcionamiento de esta celda es prácticamente una fotosíntesis sintética. Sus ventajas son los bajos costos de producción y el bajo impacto ambiental, pero su eficiencia en laboratorio ha llegado aproximadamente a un 12%. Pueden utilizar la radiación difusa de buena manera, mejor que las de silicio monocristalino. En paneles comerciales solo han alcanzado eficiencias de 2 a 3%. Son transparentes y pueden hacerse sobre materiales flexibles. De acuerdo con el Laboratorio de Energías Renovables de Estados Unidos, se ha podido aumentar su eficiencia, desde los años ochenta, por medio de la utilización de multicapas y materiales de mayor absorbencia. Todavía falta la experiencia sobre la vida útil, hacer estudios de degradación y dar el paso a la comercialización.

Es interesante resaltar la historia de esta tecnología solar que comienza con el descubrimiento del efecto pv en 1839 y con el desarrollo inicial que se dio para usos en el espacio exterior (1958), en donde se carecía de otro tipo de energía. En la Tierra sus usos fueron para suplir de energía a sectores lejanos a la red eléctrica (sistemas pv como islas, *off-grid*), por ejemplo, zonas rurales aisladas, faros, etcétera. Actualmente, la energía fotovoltaica es parte importante de la matriz energética de algunos países, por lo que el desafío es poder integrarla al sistema de distribución, física y políticamente, ya sean instalaciones individuales (*grid connected*) o plantas generadoras.

El gran aumento de energía solar en la matriz energética chilena en los últimos años se debe a la instalación de grandes centrales de generación eléctrica mediante paneles fotovoltaicos. El problema con ellos es el almacenamiento de la energía eléctrica debido a la naturaleza intermitente de la radiación solar para abastecer en horas de alta demanda y bajo recurso solar, lo que motiva la investigación en alternativas para guardar la energía químicamente, térmicamente o en centrales de bombeo (como energía potencial).

La tecnología PV abarca alrededor del 40% de los trabajos de tesis analizados. Se caracteriza por su diversidad, incluso encontramos trabajos interdisciplinarios, que combinan las especialidades de mecánica, electricidad, electrónica y construcción. La mitad de estos trabajos son estudios y evaluaciones de aplicaciones utilizando paneles PV mono y policristalinos (iluminación, plantas PV, electrificación rural). Hay varios estudios económicos en el área industrial y sobresalen los trabajos del área electricidad, entre los que destacan estudios de componentes de un sistema PV (convertidores), así como aquellos que abordan la práctica de la movilidad solar (vehículos).

FIGURA 4. APLICACIONES TÍPICAS EN TRABAJOS PV EN LA UTFSM



Fuente: elaboración propia



::: Celdas PV en Baquedano, c.1970.
Fuente: Archivo del Laboratorio Solar, UTFSM



::: Auto solar Ergon UTFSM, 2014. Fotografía de Mauricio Osses

4.2 Proyecto con el Instituto Solar de Jülich (Alemania)

Entre los años 1991 y 1995, la UTFSM, en conjunto con el Instituto Solar de Jülich (SIJ), de Alemania, la Universidad de Tarapacá, la Universidad de La Serena y Conaf, desarrollaron un proyecto financiado en gran parte por el Ministerio de Desarrollo y Tecnología germano. También fueron apoyados económicamente por la Comisión Nacional de Energía (CNE) y la Corporación Nacional Forestal (Conaf). El proyecto fue presentado por los profesores Klemens Schwarzer del SIJ y el profesor Pedro Roth de la UTFSM, quienes se conocieron en un seminario internacional de ISES (International Solar Energy Society), la organización internacional dedicada al desarrollo de energía solar.

El objetivo de este proyecto era desarrollar y realizar ensayos de nuevas tecnologías en Chile en el ámbito de las energías renovables no convencionales (ERNC). Las pruebas fueron realizadas en localidades rurales mediante la implementación de diferentes sistemas energéticos. En esa época, el norte de Chile presentaba características óptimas para la implementación de sistemas aislados de ERNC, ya que contaba con muchas localidades pequeñas (de 15 a 300 habitantes) de baja demanda energética, muy alejadas unas de otras y a gran distancia de alguna red de transmisión eléctrica. Existía alta pobreza en la población de estas localidades, en gran parte causada por la falta de energía y agua; situación que tanto el Estado chileno, como algunas instituciones internacionales, deseaban cambiar. Según el programa de electrificación rural, en 1994 más de 20.000 viviendas del norte de Chile carecían de conexión eléctrica.

Por otro lado, las radiaciones solares medidas en el norte de Chile corresponden a una de las más altas del planeta y, en sectores costeros, el viento está presente casi todo el año. Ambas, características muy favorables para la aplicación de ERNC. Durante el proyecto se tomaron datos solares y eólicos y se evaluaron los consumos energéticos de algunas localidades. Luego, en base a los datos obtenidos, se diseñaron sistemas PV e híbridos (solar-eólico), que fueron modelados mediante el software Carnot (desarrollado por SIJ). Dichos sistemas se construyeron e instalaron en Piedras

Bonitas, Cárcamo y Caleta El Maitén (Región de Coquimbo) y en Colpitas y Chaca (Región de Arica y Parinacota). Posteriormente se hizo seguimiento al consumo energético y de agua de la población y del funcionamiento de los sistemas.

Por otro lado, se probaron varios tipos de hornos y cocinas solares. En el área empresarial, se hizo un análisis energético a una destilería de pisco, con el fin de aumentar su eficiencia energética y racionalizar tanto los eléctricos como hídricos. Además, se hizo un estudio sobre la implementación de una planta de biogas. En estas iniciativas, se instalaron ocho sistemas PV para colegios y casas comunitarias, 30 sistemas solares para viviendas, un sistema solar PV para iluminación de calles, una estación de carga de baterías para 40 viviendas, un sistema eléctrico portátil para reparación de botes y cuatro sistemas PV de bombeo para agua potable y regadío.

Los resultados obtenidos fueron valiosos, dado que las tecnologías aplicadas mostraron datos en parte divergentes con los comúnmente utilizados para los modelamientos. Además, al instalar estas tecnologías en sectores rurales, se abordaron desafíos en el ámbito sociocultural, muy importantes de considerar en este tipo de proyectos.

La experiencia descrita no solo involucró a los habitantes de las localidades mencionadas. Durante el convenio con el SIJ se realizaron más de 20 intercambios de estudiantes entre las dos instituciones —UTFSM y SIJ—, se escribieron cuatro publicaciones internacionales y una nacional y se realizaron doce memorias de título en la FH Aachen y otras tantas en Chile.

El profesor Schwarzer participó en la fundación del Instituto Solar de Jülich en 1992, cuyo objetivo es desarrollar tecnologías para apoyar el desarrollo sustentable del planeta y difundir los beneficios del uso de energías renovables. Aquello ocurría en un momento en que pocos pensaban que sería posible abastecer un país como Alemania con más de 30% de energía renovable, como se hace actualmente.

El profesor Schwartzler rememora sus viajes a Chile como verdaderas aventuras⁶. Viajaba junto a sus estudiantes de último año, que

⁶ Entrevista realizada a Klemens Schwarzer por Miriam Roth en Alemania, febrero de 2019.

tenían como trabajo de tesis los estudios y la instalación de los sistemas en estos poblados. Sus estadías fueron simples en infraestructura, pero muy cálidas socialmente, recuerda: «la gente nos recibía como verdaderos *rock stars*». Con una sonrisa, evoca la inauguración del sistema fotovoltaico en Piedras Bonitas. El pequeño acto se convirtió en una gran procesión de sillas, toldos, micrófonos y de autoridades bien vestidas que llegaron desde la ciudad de Monte Patria por el empinado camino de tierra hasta esa pequeña localidad, donde se había instalado un sistema de abastecimiento de energía eléctrica fotovoltaica autónomo. Por suerte, alguien le prestó un pantalón y chaqueta para el acto, ya que solo llevaban su ropa de trabajo. Los niños del pueblo, bien vestidos y muy peinados, portaban banderas alemanas en agradecimiento al grupo que les había habilitado un servicio tan básico. Pero como los absurdos también son parte de la vida humana, todas las banderas tenían los colores cambiados de orden (amarillo, rojo y negro), porque la bandera alemana estaba impresa al revés en el libro de enseñanza del colegio.

5. ENERGÍA SOLAR PASIVA (PAS)

5.1 Destilación solar

Entre los usos técnicos más difundidos de la energía solar pasiva están las tecnologías de destilación solar, un tema de larga trayectoria en la UTFSM, en el que se han estudiado distintos diseños de colectores para destilar agua de mar. La destilación solar se logra al evaporar el agua de mar desde piscinas, para luego condensarla en superficies transparentes, de vidrio o plástico, y guiarla por canales que acumulan agua pura.

Desde sus inicios, en el Laboratorio Solar de la UTFSM hubo interés por los destiladores solares. Julio Hirschmann quiso rescatar la historia de las desalinizadoras de Charles Wilson en el desierto de Atacama (ver capítulo 2) y escribió sobre el caso⁷. También co-

⁷ Julio Hirschmann, «A Solar Energy Pilot Plant for Northern Chile», *Solar Energy* 2 (1961): 37-43.

menzó su propia investigación, a la que se unieron colaboradores del laboratorio y de la que dio cuenta en un trabajo publicado en 1975⁸. El trabajo de Cancino, Roth y Bonneschky⁹ hizo una revisión retrospectiva de la destilación solar en Chile entre 1872 y 2001.

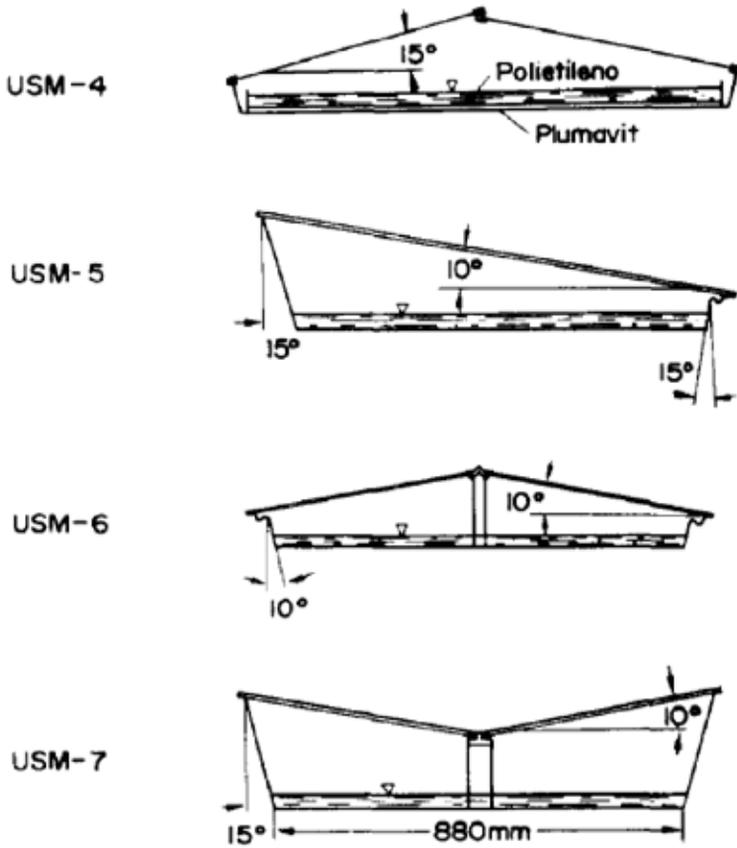
Entre las tesis en energía solar, hay 24 dedicadas a la destilación, lo que corresponde a un 13% de las tesis en energía solar pasiva y a un 4,5% del total de las tesis de la universidad. El proyecto más grande de la UTFSM en esta área fue la planta de desalinización de Quillagua en el desierto de Atacama, desarrollada en 1966 (ver capítulo 5).



::: Instalación de 100m² de destiladores solares en Quillagua por la UTFSM, 1966. Fuente: Archivo del Laboratorio Solar, UTFSM

⁸ Julio Hirschmann, «Solar Distillation in Chile», *Desalination* 17 (1975): 17-30.

⁹ B. Cancino, P. Roth y A. Bonneschky, «Review of Solar distillation in Chile 1872-2001», en *7th World Renewable Energy Congress* (Colonia, 2002).



::: Diagramas elaborados por Julio Hirschmann¹⁰

5.2 Helioarquitectura

Desde 1964, el Departamento de Ingeniería Mecánica de la UTFSM incluyó en el plan de estudios de la carrera materias optativas relacionadas con la energía solar. El curso general de Heliotecnia comenzó en 1978 y se ha mantenido desde entonces; en 1990 se agregó un laboratorio aplicado. Las actividades de laboratorio incluyen la determinación y estudio de curvas características de distintas

¹⁰ Julio Hirschmann, «Solar Distillation in Chile», *Desalination* 17 (1975): 17-30.

tecnologías solares, por ejemplo, para un panel fotovoltaico o de un colector plano para calentar agua. También integran la determinación de temperaturas típicas y el comportamiento térmico de diferentes aplicaciones, como un muro Trombe o un invernadero.

La formación en heliotecnía ha tenido por objetivo dar a conocer las posibilidades de la energía solar y, a partir de ese conocimiento, diseñar aplicaciones de distinto tipo, por ejemplo, calefacción de agua, aire, calefacción y aplicaciones industriales. Los cursos generales comienzan por enseñar los fundamentos de astronomía y de radiación solar, para seguir con la medición de la radiación y su cálculo sobre diversas superficies. A partir de esta base se abordan las aplicaciones tecnológicas, su comportamiento, los criterios de cálculo para el diseño de sistemas solares y los análisis técnico-económicos correspondientes. En Chile se han escrito algunos textos destinados a la enseñanza, como por ejemplo *Energía solar. Aplicaciones e ingeniería*¹¹.

Un área de formación más reciente, desde 2000, ha sido la helioarquitectura, que se ocupa del aprovechamiento de la energía solar en la construcción de edificios, considerado un uso pasivo de la energía solar. El gran interés demostrado por los arquitectos dio origen a un libro de aplicaciones solares en arquitectura¹². El objetivo de la formación en esta área es considerar la energía solar en el diseño y construcción arquitectónica en cuanto a sus efectos en bienestar térmico, iluminación, ventilación natural y otros aspectos bioclimáticos¹³. En Chile, se ha incrementado el estudio de estos temas por la reglamentación térmica del Ministerio de Vivienda y Urbanismo, que obliga a mantener ciertos estándares en el plan de la eficiencia energética, según regiones climáticas.

¹¹ Pedro Sarmiento, *Energía solar. Aplicaciones e ingeniería* (Valparaíso: Ediciones Universitarias de Valparaíso, 2016).

¹² Pedro Sarmiento, *Energía solar en arquitectura y construcción* (Santiago: RIL editores, 2007).

¹³ Universidad de Chile, Instituto de la Vivienda, Universidad Tecnológica Federico Santa María, *Bienestar Habitacional. Guía de diseño para un hábitat residencial sustentable*, Proyecto Fondef D0011039, agosto de 2004.

En esta área se han desarrollado softwares para estudiar el efecto de la radiación solar sobre las construcciones, simulando, por un lado, la luminosidad y la sombra y, por otro, el efecto de calentamiento mediante transferencia de calor (radiación, convección y conducción). Para el estudio del calentamiento se utilizan modelos que necesitan de información meteorológica del sector, como temperatura e irradiancia en el lugar. Idealmente, estos datos deben recogerse en forma transiente, es decir, por hora al día y no solo datos promediados. Se deben analizar mediciones de varios años para asegurar que los datos cuenten con estabilidad estadística.

En los últimos años se han logrado grandes avances en arquitectura, desarrollando casas «pasivas» que, en muchas ubicaciones geográficas, no necesitan energía adicional para mantener condiciones confortables de temperatura, humedad y aire fresco (es decir, entre 18°C y 24°C de temperatura de paredes y entorno, 35 a 75% de humedad, y velocidad aire y cantidad de oxígeno adecuadas). Generalmente, aquí se combinan las tecnologías pasivas y activas para transportar aire fresco y temperado hacia todos los sectores de la construcción con la ayuda de un ventilador.

Las innovaciones en materiales o accesorios son otro de los grandes desarrollos de la helioarquitectura. El uso de superficies transparentes que se orientan hacia el Ecuador permite maximizar las ganancias térmicas en invierno mediante radiación directa y, a su vez, reducen pérdidas de calor en invierno, o ganancias de calor en verano. Se han desarrollado también nuevos vidrios con láminas de diferentes grados de transmitancia, o diferentes filtros UV, pero gran resistencia a la transferencia de calor (termopanel). El uso de vidrios dobles o incluso triples (llenos con gases inertes, como el argón) ya es estándar en regiones de bajas temperaturas, dado que las transmitancias térmicas de ventanas simples son muy altas. Hay que considerar que las ventanas y los ductos de ventilación son los puntos de mayor pérdida térmica en una casa, por lo tanto, la atención se ha centrado en ellos. El precio de las ventanas reforzadas ha bajado entre 20 y 40% en los últimos años, y en varios países

la reglamentación exige resistencias térmicas mínimas, que ya no permiten el uso de vidrios y marcos de aluminio simples.

Además, se han desarrollado materiales que absorben energía térmica para almacenarla hasta las horas de frío. Estos materiales actúan como masas térmicas. Uno de los más conocidos es el muro Trombe, que combina masa térmica y superficie transparente. Por lo general, se instala el material dentro de la vivienda para que actúe como acumulador de calor, directamente.

Otro desarrollo importante se ha dado en las estructuras (fijas o móviles) que hacen sombra para evitar sobrecalentamiento en verano. Evitar que ingrese radiación solar directa por la superficie transparente es el mejor mecanismo; las persianas externas son mucho más efectivas que las internas, ya que la energía no ingresa a la vivienda. Entre las innovaciones en esta área están los mecanismos que controlan automáticamente la entrada de la radiación, activados mediante sensores fotosensibles muy utilizados en oficinas y edificios. Otra de estas innovaciones son las celdas fotovoltaicas que, aparte de producir sombra evitando la entrada de energía solar, producen energía eléctrica.

La envolvente de las construcciones es un aspecto que se ha desarrollado bastante en torno a la eficiencia energética, ya que cumple la función de aislar del ambiente externo. Las envolventes deben ser poco permeables al flujo de calor, por lo que se han desarrollado diferentes materiales con altas resistencias, o bajas transmitancias térmicas; por ejemplo, paneles compactos de diferentes materiales en capas. En el desarrollo de las nuevas «casa solar zero», las envolventes también juegan un rol muy importante, dado que estas viviendas se diseñan para que produzcan tanta energía eléctrica y térmica como la que utilizan.

Otra área de desarrollo tecnológico es el uso de superficies transparentes estratégicamente ubicadas y la instalación de espejos, que reflejan rayos solares hacia el interior de las construcciones, para aumentar la luminosidad de espacios. El tragaluz y los *solar tubes* son ejemplos de ello.

Estas tecnologías pasivas comenzaron a ser estudiadas en la UTFSM, con mayor frecuencia, desde el año 1980. Hasta 2018 había 22 trabajos de tesis en este rubro, varios de ellos eran sobre el muro Trombe, techo activo, iluminación natural y estudios de viviendas sustentables mediante el uso de energía solar.

El uso de invernaderos para mantener condiciones óptimas de crecimiento de plantas y el cultivo de algunas especies que naturalmente no podrían crecer en ciertas zonas, es una aplicación muy típica de la energía solar pasiva. La superficie transparente es, en general, plástico, vidrio u otro material transparente para producir el efecto de «oso polar» o «invernadero».

Ya en la década de 1970, el Laboratorio de la UTFSM realizaba investigaciones sobre cultivos intensivos bajo carpas plásticas herméticas en Calama, con la participación del Dr. Hans Jürgen Daunicht, reconocida autoridad mundial sobre el tema, quien, por entonces, trabajaba en el Laboratorio. La UTFSM desarrolló una relación con la Escuela Agrícola de Curimón que permitió concretar varios proyectos, entre ellos un invernadero experimental.



::: Invernadero experimental en la Escuela Agrícola de Curimón, 1988.
Fuente: Archivo Personal de Pedro Sarmiento

5.3 Cocinas, secadores y hornos solares para alimentos

Una aplicación que se ha desarrollado bastante en zonas geográficas aisladas de alta radiación solar son las cocinas y hornos solares para uso doméstico, que también se cuentan como parte del uso de la energía solar directa en forma pasiva. En el primer caso, se usan espejos que concentran la radiación en un foco donde se posiciona la olla. En el segundo, los espejos calientan un espacio cerrado y aislado, donde se ingresan alimentos a cocinar u hornear. Este tipo de aplicación tuvo un auge en la UTFSM en los ochenta, precisamente en relación con el trabajo conjunto con la institución alemana de Jülich. Se hicieron varios proyectos sociales en el Norte Chico, por ejemplo, instalando cocinas solares en escuelas rurales o en Villaseca, en el valle del Elqui. Este trabajo se destaca por el continuo seguimiento del proyecto, que permitió concluir que es muy importante la capacitación del uso y mantenimiento adecuado de estas tecnologías a los usuarios, para que sea una solución sostenible en el tiempo.



::: Cocinas solares en concurso de Escuela de Verano de 1964.
Fuente: Archivo del Laboratorio Solar, UTFSM



::: Horno industrial UTFSM, c.1970.

Fuente: Archivo del Laboratorio Solar, UTFSM

Una aplicación pasiva que últimamente ha tomado importancia en Chile por el gran desarrollo de la agricultura exportable es el secado de frutas. A nivel industrial, sin embargo, generalmente se combina con algún sistema mecánico (ventilador) para hacer circular el aire en condiciones adecuadas. En este aspecto se encuentran varios trabajos recientes dedicados al desarrollo tecnológico de secadores de alimentos en la zona central de nuestro país.

Entre las tesis realizadas en la UTFSM existen cuatro trabajos dedicados directamente al secado en forma pasiva y 10 al cultivo controlado (invernaderos). Uno de los profesores del área de proyectos del Laboratorio formó una empresa de secadores industriales autónomos que logró sustentarse como emprendimiento privado.

6. ENERGÍA SOLAR TÉRMICA ACTIVA (ACT)

Las tecnologías que utilizan la energía térmica proveniente del Sol, junto a elementos mecánicos para su aplicación, se clasifican dentro de la energía solar activa. El elemento mecánico generalmente amplía el rango de aplicaciones, optimiza la transferencia de calor e incluso permite el transporte de energía hacia fuentes térmicas mayores por medio de un ciclo termodinámico. La mayoría de las aplicaciones son para calefaccionar o refrigerar espacios. En esta sección también se analizarán los acumuladores, dado que son fundamentales para lidiar con la desventaja de la generación de energía térmica intermitente, propia del ciclo solar.

6.1 Calentamiento solar

El calentamiento de agua o aire es una tecnología bastante difundida a nivel mundial desde hace muchos años. Para ello, el elemento principal es un colector solar que tiene una superficie absorbente (generalmente negra) que transmite energía térmica a un fluido (aire o agua) para transportarlo hacia el punto de consumo, o hacia un estanque aislado para su almacenamiento y posterior uso. En general, existen tres tipos de colectores posicionados en el mercado: el *colector simple*, para generar agua a temperaturas bajas; el *colector plano* de tapa de vidrio para temperaturas medias; y el *colector de tubos al vacío*, para temperaturas altas.

El *colector simple* consta de tubos negros por los que circula un fluido (agua, aire) que absorbe directamente la radiación solar y la traspasan al fluido para su uso inmediato. El caso más simple lo constituyen tubos en serpentin. Para vencer las pérdidas de carga por la tubería se necesita una bomba hidráulica. Los sistemas con *manifold* tiene una construcción con menores pérdidas de carga, y por ello necesita una bomba más pequeña. En el sistema *manifold*, varios tubos en paralelo salen, desde una tubería mayor, hacia otra tubería que recolecta el fluido calentado. En general las superficies del colector son amplias y es importante que estén expuestas libremente

—sin sombra— a la radiación solar directa la mayor cantidad de horas al día. La aplicación típica de este tipo de colector es para el temperado de piscinas o para el uso de agua caliente sanitaria (ACS) en sectores rurales aislados.

El *colector plano* consta de una superficie absorbente inserta en un marco aislado. Su parte superior tiene una superficie transparente, generalmente vidrio simple o doble. Esto permite captar la energía solar directa, producir un efecto invernadero dentro del colector calentando el aire en su interior; con ello, se minimiza la pérdida de calor al exterior. La calidad de estos colectores varía enormemente, dado que su construcción es bastante simple, utiliza materiales accesibles y se pueden instalar sobre techos o paredes. Esta tecnología tiene una muy buena relación costo-beneficio, lo que explica su masivo uso, sobre todo en países de alta radiación solar. Esto, junto con políticas públicas adecuadas, hace que algunos países, como Turquía, tengan pueblos o ciudades donde la mayoría de las casas tienen colectores solares montados en el techo de viviendas y edificios. Su aplicación típica es la generación de ACS. Su mayor problema generalmente es la falta de personal calificado para mantener y reparar los sistemas.

Los *colectores de tubos al vacío* se consideran una evolución de los colectores planos, dado que buscan generar más calor en menos espacio. Utilizan la superficie curva de un tubo de vidrio para concentrar la radiación solar en el centro del tubo y aumentar la energía absorbida por la radiación solar directa. El interior del tubo está evacuado de aire para evitar altas pérdidas por convección. Este tipo de colector puede alcanzar temperaturas entre 80 y 180°C, generando incluso vapor que, al condensarse en una superficie más fría, entrega el calor latente. Su construcción y materiales son más sofisticados, por lo que su precio también es mayor que los colectores planos.

Un sistema simple de agua caliente sanitaria (ACS) se puede realizar como sistema pasivo: por medio del efecto termosifón (TS) el agua caliente llega al estanque acumulador y el agua más fría circula hacia el colector (no necesita bomba). En general, este se combina con un ICS (*Integral Collector Storage*, o colector de almacenamiento

integral). Sin embargo, hoy se utiliza solo en regiones rurales o aisladas, lejanas a la red de electricidad. Tiene bajos costos y es amigable para el consumidor, pero en regiones con bajas temperaturas nocturnas o invernales no es bueno, ya que pierde mucha energía y el agua puede congelarse en la noche, produciendo roturas de tuberías.

Los sistemas abiertos son aquellos donde el fluido a calentar pasa directamente por el colector para su posterior uso. Un sistema cerrado utiliza un segundo fluido como termoportador y entrega la energía térmica al agua o aire a utilizar mediante un intercambiador de calor. Esto aumenta el precio de inversión pero reduce costos de mantenimiento, ya que el fluido portador térmico que circula en el sistema se mantiene limpio. Para circular el agua por el sistema se utilizan bombas eléctricas controladas mediante sensores de temperatura. Existen tres sistemas solares activos típicos para ACS que dependen de la aplicación y del clima en el lugar de la instalación:

- a) Sistema abierto que lleva agua sanitaria por el colector.
No es bueno en regiones que tiene temperaturas bajo cero y donde el agua es muy dura.
- b) Sistema cerrado donde el fluido portador de calor es una mezcla de glicol que impide el congelamiento con temperaturas habituales de invierno.
- c) Sistemas abiertos donde, al desconectar la bomba, el agua baja por gravedad vaciando los tubos expuestos a la intemperie.

El *boom* de las viviendas y edificios cero emisiones, ha puesto en vigencia los sistemas combinados que proveen agua caliente para climatización (la loza radiante necesita bajas temperaturas, 35-45°C) y para uso sanitario (45-65°C). Estos sistemas, en general, se apoyan con otras tecnologías de calentamiento para horarios o períodos de escasa radiación solar.

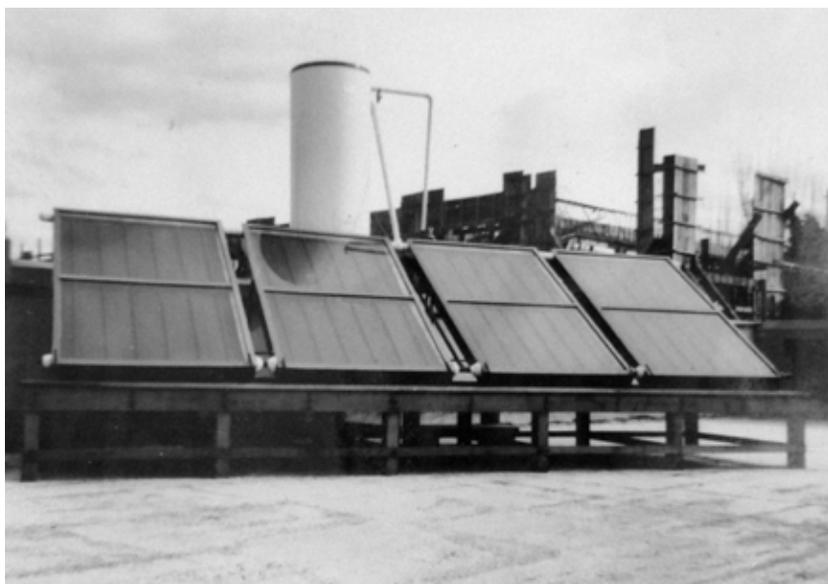
Los colectores solares han sido objeto de estudio reiterado en la UTFSM. Se encuentran más de 32 trabajos de título al respecto; de ellos, la mayoría refiere al desarrollo de colectores solares planos. Se

encuentran 27 relacionados con sistemas de ACS, 10 de temperado de piscinas, 29 en calentamiento de aire dedicado a invernaderos, calefacción y secado. También se encuentran algunas combinaciones de calefacción asistida con bombas de calor. Existen instalaciones de ACS realizadas por la UTFSM en los años sesenta que aún pueden verse en los techos de casas o edificios en Valparaíso y que, según dicen sus propietarios, están funcionando, como es el caso de un sistema instalado en una residencia particular en Chorrillos.



::: Instalaciones experimentales para estudios sobre calentamiento de agua y aire acondicionado, c.1960.

Fuente: Archivo del Laboratorio Solar, UTFSM



::: Instalaciones experimentales para estudios sobre calentamiento de agua y aire acondicionado.

Fuente: Archivo del Laboratorio Solar, UTFSM

El proyecto desarrollado por la UTFSM y la Escuela de Curimón, en los años setenta, incluyó una cámara de secado y un colector solar plano para una planta deshidratadora de productos agrícolas. Primero se instaló el sistema de secado, luego el de agua caliente. Para los ingenieros de la UTFSM fue interesante observar el aprendizaje que los usuarios lograban en el uso de la instalación y cómo adaptaban sus prácticas para aprovechar mejor las instalaciones solares. Por ejemplo, las encargadas de cocina de la escuela, al darse cuenta de que podían contar con agua caliente a partir de las diez de la mañana, reorganizaron su rutina para lavar la loza a partir de esa hora.



::: Cámara de secado y colector solar de planta deshidratadora de Curimón, 1988.

Fuente: Archivo Personal de Pedro Sarmiento.

Hace algunas décadas, uno de los grandes desafíos en torno a las instalaciones de ACS fue determinar eficazmente el rendimiento de los colectores. Otro, no menos importante, fue convencer a los usuarios que hacer mantenimiento era esencial para alargar la vida útil de los equipos. La universidad tuvo un rol importante tanto en el desarrollo de colectores y en sus mediciones, como en la formación de profesionales y técnicos especialistas en esta tecnología. Al ser una tecnología relativamente nueva, no había muchos especialistas en ello. Hoy existen en Chile más de 50 empresas que ofrecen colectores solares (al menos 50 están inscritas en SEC¹⁴). En los últimos años el desarrollo se ha centrado en el uso o la creación de software de modelamientos, como, por ejemplo, para el cálculo de la capacidad térmica o para el dimensionamiento de un sistema ACS según la zona geográfica. Un ejemplo desarrollado en la UTFSM es el software para

¹⁴ <http://wlhttp.sec.cl/BuscadorSST/buscador.do>

determinación de área óptima de colectores solares planos para calentamiento de agua sanitaria¹⁵.

Un sistema colector acumulador de calentamiento solar de agua —INGESOL— fue desarrollado en la UTFSM y patentado por el profesor Pedro Sarmiento en el año 1990¹⁶. INGESOL se caracteriza por ser de alto rendimiento, comparado a sistemas diseñados para el mismo fin disponibles en el mercado¹⁷; producir temperaturas máximas mayores y funcionar por efecto termosifón o convección natural y conectado a la red, por lo que no requiere de electricidad para operar. Por su diseño, no requiere sistema anticongelante ni estanque de expansión, y puede integrarse estéticamente en la techumbre del edificio. Al ser un sistema integral, de alto rendimiento, el costo resulta menor que un sistema convencional de igual producción. Este sistema se instaló en escuelas y residencias particulares, lo que permitió probar la tecnología en uso en base a las condiciones locales¹⁸.

¹⁵ Software disponible en <https://repositorio.usm.cl/handle/11673/6049?show=full>, tesis sobre el software: Gabriel A. Betancourt, *Software de cálculo de área óptima para calentamiento de agua sanitaria en colectores solares planos*, tesis para optar al título de Ingeniero Mecánico Industrial (Valparaíso: UTFSM, 2008). Profesor guía: Pedro Sarmiento.

¹⁶ Manuel T. Oliva Hinojosa, *Estudio experimental del comportamiento de un sistema de calentamiento solar de agua del tipo colector acumulador (Patente de invención No. 36859, Chile, 1990)*, tesis para optar al título de Ingeniero de Ejecución Mecánico (Valparaíso: UTFSM, 1991). Profesor guía: Pedro Sarmiento.

¹⁷ Guillermo E. Sanguinetti Pérez *Estudio comparativo y experimental del comportamiento de los sistemas de calentamiento de agua del tipo convencional y colector acumulador*, tesis para optar al título de Ingeniero de Ejecución Mecánico (Valparaíso: UTFSM, 1991). Profesor guía: Pedro Sarmiento.

¹⁸ Marcelo A. Cárdenas Álvarez, *Estudio del comportamiento de un colector solar acumulador, en condiciones reales de funcionamiento*, tesis para optar al título de Ingeniero de Ejecución Mecánico (Valparaíso: UTFSM, 1992). Profesor guía: Pedro Sarmiento.



Nº 36859

Int. Cl. F 24 J 3/03.-

MINISTERIO DE ECONOMIA, FOMENTO Y RECONSTRUCCION

DEPARTAMENTO DE PROPIEDAD INDUSTRIAL

PATENTE DE INVENCION

Visto la resolución dictada, concédese Patente de Invención a:

PEDRO CLAUDIO SARMIENTO MARTINEZ. (Inventor de la Patente).

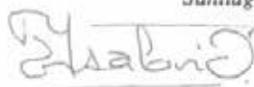
Domiciliado en Calle Línache 2211, Depto. 31, Viña del Mar,
CHILE.-

TÍTULO:

"Sistema colector-acumulador de calentamiento solar
de agua".

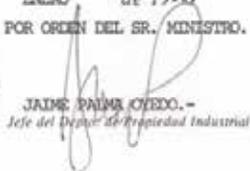
*El plazo de concesión para explotar en el país el invento es de
15 años, a contar desde el 05. 12. 89.*

Santiago de Chile, 08 de ENERO de 1990.


IVAN VRSALOVIC OSTOJIC.-
Conservador de Patentes de Invención



FOR ORDEN DEL SR. MINISTRO.


JAIME PALMA OYEDO.-
Jefe del Depto. de Propiedad Industrial

::: Patente INGESOL, 1990. Fuente: Archivo Personal de Pedro Sarmiento.



::: Sistema INGESOL en Liceo de Isla de Pascua, 1991.
Fuente: Archivo Personal de Pedro Sarmiento.

6.2 Refrigeración solar

A diferencia del calentamiento natural en cuerpos irradiados por el Sol, la refrigeración solar es un poco más compleja y se basa en principios diferentes. Aquí podemos diferenciar la refrigeración eléctrica solar, la refrigeración térmica solar y el acondicionamiento de aire solar.

- a. *Refrigeración eléctrica solar*: utiliza paneles pv para producir la electricidad que alimenta un sistema de refrigeración convencional o un elemento Peltier, produciendo un lado de temperatura alta y otro de temperatura baja. Esta tecnología solo tiene sentido si se utiliza en sectores lejanos a redes

eléctricas, ya que al tener sistemas PV es más beneficioso ingresar la electricidad generada a la red de distribución.

- b. Refrigeración térmica solar:* utiliza la energía solar para generar la fuente de calor de un ciclo termodinámico de refrigeración. Se distinguen varias tecnologías, como la compresión mecánica, en la que el Sol produce vapor para generar energía mecánica por medio de una turbina y mover el compresor de un sistema de refrigeración convencional; la absorción, una tecnología conocida desde el siglo XIX que refiere a la propiedad de algunos medios para absorber líquidos (reacción exotérmica) y para emanar vapor (reacción endotérmica); y, por último, la adsorción, que corresponde a la interacción en la superficie de un sólido (el adsorbente) y un gas (el refrigerante). La naturaleza de esta interacción puede ser física o química, dependiendo de la causa de las fuerzas de adsorción.
- c. Acondicionamiento de aire solar:* implica una combinación de deshumidificación y procesos de enfriamiento por evaporación. Es una aplicación típica para acondicionar aire en edificaciones.

De acuerdo con la aplicación se debe seleccionar la tecnología y el colector, dado que los rangos de temperatura son diferentes. Un estudio completo de las diferentes tecnologías, sus ventajas y desventajas, es la de Allouhi y su equipo¹⁹.

Entre las tesis realizadas en la UTFSM se encontraron seis de refrigeración solar, incluyendo tesis de absorción como adsorción.

6.3 Almacenamiento térmico

Los sistemas de almacenamiento son muy importantes en las tecnologías térmicas solares, ya que aseguran la entrega de calor en horas de baja radiación solar, es decir, aumentan la confiabilidad y

¹⁹ A. Allouhi et al., «Solar driven cooling systems: An updated review», *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 44 (2015): 159-181.

eficiencia de la instalación. Entre las técnicas de acumulación térmica se distinguen:

- a. *Calor sensible*, que mayormente utiliza agua. Es una técnica simple, pero genera grandes volúmenes de acumulación térmica.
- b. *Calor latente*, que utilizan la energía necesaria para el cambio de fase de una sustancia. Es más compacta, ya que tiene densidades energéticas mayores.
- c. *Absorción o adsorción*, que mantiene energía almacenada (generalmente de vapor de agua) en materiales líquidos o sólidos. Se encuentra en fase de investigación. Puede almacenar hasta cuatro veces más energía térmica que las de calor sensible.
- d. *Termoquímico*, que almacena energía en reacciones químicas endotérmicas. Usa sales, con o sin hidrógeno, y presenta ocho a 10 veces mayor capacidad para almacenar que el agua. También se encuentra en fase de investigación.
- e. *Almacenamiento en acuíferos o en subsuelo*, que utiliza capas naturales para almacenar energía mediante la extracción e inyección de agua caliente al subsuelo.

Se encontraron 16 tesis en esta área, entre las que sobresalen los estudios de almacenamiento bajo tierra, incluso para el almacenamiento estacional. Varios trabajos analizan los acumuladores de grava con una simulación de la pérdida de calor.

7. CENTRALES TÉRMICAS SOLARES (CSP)

La tecnología CSP (por sus iniciales en inglés: *Concentrated Solar Power*) se utiliza en centrales que constan de mecanismos concentradores de radiación solar para calentar a altas temperaturas un fluido portador de energía térmica. A su vez, esta pasa por turbinas de aire, o bien, produce vapor y luego fluye a través de turbinas de vapor convencionales, para generar electricidad.

La concentración de la energía solar se realiza por reflexión de los rayos solares en espejos orientados hacia un foco lineal en el caso de los Fresnel, o puntual en el caso de los espejos parabólicos. Dado que se utiliza la radiación solar directa, esta tecnología tendrá mayores factores de planta en regiones de baja nubosidad y alta radiación solar.

Lo interesante de estas centrales es que la mayoría de la electricidad en el mundo se produce actualmente por centrales con ciclos térmicos de aire / gas (Bryton) o vapor (Rankine), por lo que estos sistemas de generación de energía eléctrica (turbomáquinas térmicas) son bastante conocidos y están muy desarrollados. El concentrador solar simplemente reemplaza la fuente de calor, es decir, el combustible fósil o la fusión nuclear; fuentes que hoy son parte de la discusión ambiental y social.

Existen cuatro grandes grupos de centrales de concentración:

- a. canales parabólicos,
- b. reflectores lineales (Fresnel),
- c. torre central con helióstatos y
- d. discos parabólicos (Stirling).

Las primeras dos tecnologías se pueden considerar de media concentración (la temperatura varía entre 300 y 400°C); las últimas de alta concentración (más de 1000°C). Una ventaja es que la energía térmica se puede almacenar de forma más simple que la electricidad. Otra ventaja es el amplio rango de potencias existente, la modularidad de los sistemas y el hecho de que no requiere de materiales extraños o difíciles de obtener.

Los canales parabólicos constan de tubos largos que se extienden en el foco de canales de espejos parabólicos, por donde fluye un líquido portador de energía que traspasa la energía en una caldera para producir vapor, que luego alimenta una turbina de vapor convencional. En estos sistemas, la radiación solar se concentra entre 70 a 100 veces. Las investigaciones actualmente están enfocadas a

alcanzar mayores temperaturas, buscar nuevos fluidos transportadores y desarrollar acumuladores de energía térmica.

El sistema de espejos Fresnel consta de espejos planos que concentran la radiación solar en un canal donde se ubica un tubo por el que circula agua, produciendo vapor directamente. Las ventajas son la facilidad de la producción y el montaje de este tipo de espejos, junto a su fácil limpieza. Sin embargo, tiene menor eficiencia que el sistema de tubos parabólicos.

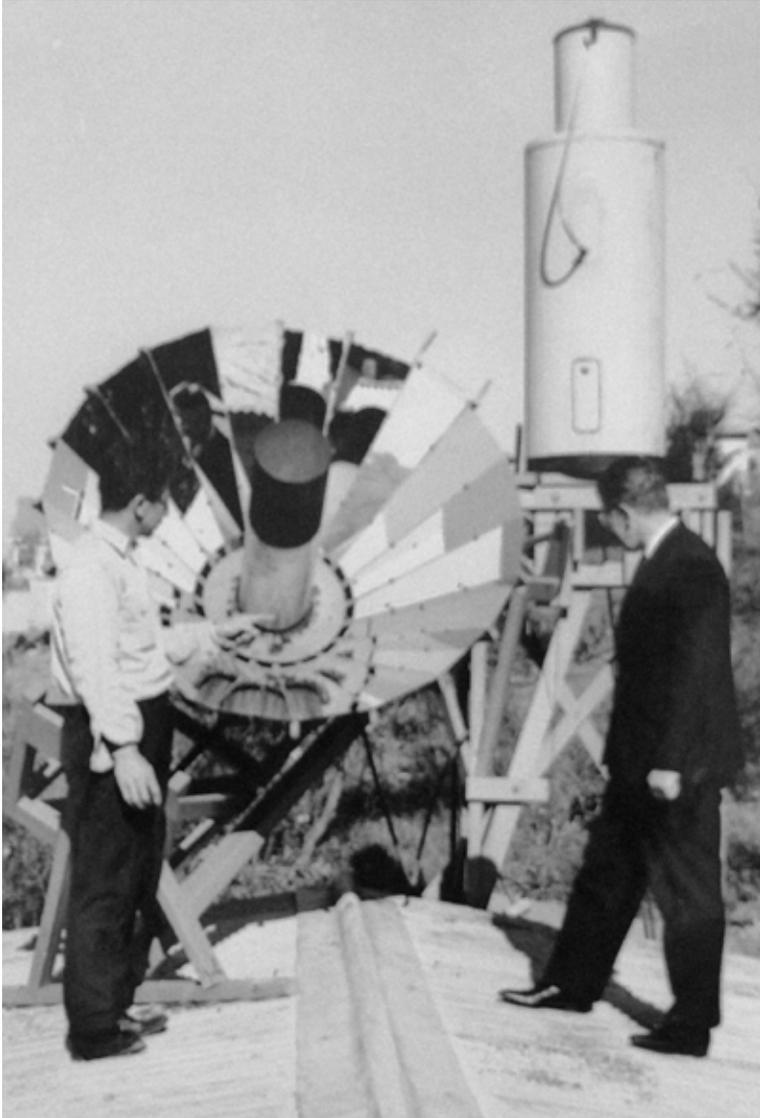
Las torres concentradoras reciben en su parte superior el reflejo de centenas de espejos planos (heliostatos). En el punto focal se hace circular un fluido portador, que luego intercambia la energía térmica en una caldera para producir vapor utilizado en turbinas convencionales. La central tiene mayores concentraciones y trabaja a mayores temperaturas (aproximadamente 1000°C), lo que las hace más eficientes que las otras CSP. Sin embargo, necesita un sistema de seguimiento de dos ejes para los heliostatos, lo que encarece su estructura, montaje, sistema de tracción y de control.

Los discos parabólicos concentran la radiación en su punto focal donde se encuentra el receptor que se mueve junto con el sistema. Están diseñados para producir altas temperaturas, pero igualmente deben seguir la trayectoria solar. Son equipos individuales y modulares que aún están en proceso de desarrollo.

Actualmente, el almacenamiento de energía térmica solar para este tipo de centrales es un área importante de investigación, dado que permite abastecer a la central en períodos que no hay radiación solar directa (de noche o días nublados), garantizando con ello una producción de electricidad continua. Por esto, las centrales con acumulación se sobredimensionan, y pueden producir tanto la energía para mover la turbina de día, como la necesaria para generar de noche.

En la UTFSM se encontraron 20 tesis dedicadas a este tipo de tecnologías. Se destaca la temprana aparición del estudio de un generador de vapor con espejos parabólicos, en el año 1980. Desde el año 2010 se observa un notorio aumento en la cantidad de trabajos: 15 son posteriores a esa fecha. Se presentan varios trabajos de

centrales con motores Stirling que operan con aire caliente, otras con colectores Fresnel y parabólicos. Además, aparecen algunos estudios de factibilidad para instalar una torre de concentración solar en el norte de nuestro país.



: :: Discos parabólicos UTFSM, c. 1970.
Fuente: Archivo del Laboratorio Solar, UTFSM.

7. COMBUSTIBLES SOLARES (FUEL)

Cuando la energía solar es convertida químicamente en combustible, se habla de combustibles solares. Una de sus grandes ventajas es que pueden ser transportados y almacenados con facilidad, lo que, hoy, constituye una de las grandes desventajas de las tecnologías solares. Los combustibles solares más comunes son el syngas (monóxido de carbono e hidrógeno) y el hidrógeno puro.

Esta área de trabajo se inspira en ideas como las de Aldo Steinfeld y Robert Palumbo²⁰: la transición a un mundo sin combustibles fósiles solo es posible si se resuelven problemas como almacenamiento y transporte del inmenso, pero intermitente, no predecible y desigualmente distribuido recurso solar.

El objetivo principal en esta tecnología es, entonces, producir estos combustibles a precios competitivos.

El *hidrógeno* tiene alta densidad energética pero, al ser un elemento tan liviano, utiliza mucho volumen. Por ello se almacena a altas presiones, lo que, junto a su alta explosividad al estar en contacto con oxígeno, hace que su transporte y almacenamiento seas complicados e inseguros. Otra desventaja es que las instalaciones y combustores actuales deben ser rediseñados, o bien se deben hacer nuevas instalaciones para el uso exclusivo con hidrógeno.

El *gas de síntesis* y sus derivados tienen la ventaja que pueden ser utilizados en los sistemas de combustión convencionales sin grandes cambios. El DME (éter dimetílico) es un gas que se asemeja al gas licuado y puede ser almacenado de manera bastante simple. El metanol, por su parte, es un líquido y puede sustituir fácilmente a la gasolina.

En general existen tres procesos, utilizados individualmente o en combinación, para generar combustibles solares.

²⁰ Aldo Steinfeld y Robert Palumbo, «Fuels from Sunlight and Water» (2001). Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/228499002_Fuels_from_sunlight_and_water

- a. *Electroquímica*: utiliza energía eléctrica proveniente de una planta solar para un proceso electrolítico.
- b. *Fotoquímica / fotobiológica*: usa directamente energía de los fotones para procesos fotoquímicos o biológicos
- c. *Termoquímico*: utiliza energía térmica de media y alta densidad en procesos termoquímicos endotérmicos para separar moléculas de agua en hidrógeno y oxígeno.

A continuación, se presentan algunas tecnologías conocidas para producir hidrógeno o syngas, que luego puede ser convertido en los combustibles ya mencionados.

La *electrólisis* del agua en un electrolizador convencional (alcalino) puede utilizar electricidad solar generada por sistemas PV o CSP para producir hidrógeno y oxígeno. El rango de eficiencia total para la conversión de energía solar a hidrógeno con las tecnologías actuales es de entre 10 y 14%, si se asume la electrólisis con 70% de eficiencia y la producción de electricidad con un 15% (PV) y 20% (CSP) de eficiencia. La energía eléctrica demandada en la electrólisis puede ser reducida si esta se realiza a mayores temperaturas (800°C a 1000°C). En estos casos, la tecnología de energía solar concentrada puede proporcionar tanto el calor como la electricidad para el proceso.

En el proceso de *termólisis* de agua se utiliza la concentración de radiación solar directa para producir altas temperaturas (mayores a 2200°C) para separar la molécula de agua en hidrógeno y oxígeno dentro un reactor. Un gran desafío presenta la construcción y el diseño del reactor para resistir las altas temperaturas y producir la separación de los gases.

Los *ciclos termoquímicos* para dividir la molécula de agua permiten la separación a una temperatura más baja, pero se requieren varios pasos de reacciones químicas. También plantean desafíos debido a ineficiencias asociadas con la transferencia de calor y la separación de productos en cada paso.

La *tecnología de decarbonización de combustibles fósiles* se vislumbra como solución de mediano plazo, e integra el uso de

combustibles fósiles y su valorización mediante energía solar. Su desarrollo es apoyado por varias naciones y es beneficioso, sobre todo, para países que tienen combustibles fósiles y alta radiación solar. Ha sido demostrada en plantas pilotos de 100-500kW. En ella se utilizan combustibles fósiles o biomasa que son decarbonizados mediante energía solar y procesos de *reforming*, *cracking* y gasificación.

En la tecnología de *síntesis de hidrógeno solar con dióxido de carbono*, con ayuda de energía solar, el agua y dióxido de carbono son convertidos en hidrocarburos que tienen propiedades similares a los combustibles fósiles existentes. El proceso de metano renovable se produce con hidrógeno solar y CO₂ de la atmósfera (u otra fuente) en un reactor con un catalizador de níquel (un buen sustituto del gas natural). El metano solar igualmente puede ser producido con agua, aire, energía solar y CO₂. Este último puede provenir de biomasa, procesos industriales o del ambiente.

Alternativamente se pueden producir combustibles como diesel, metanol, kerosene y DME mediante un proceso Fischer-Tropsch. La mayor ventaja de estos combustibles es que son similares a los combustibles fósiles actuales y, por ende, estarían en el rango de aplicación de las tecnologías existentes.

La energía solar también puede ser cosechada por vía natural mediante fotosíntesis en biocombustibles con eficiencias de 0,5%; a través de conversión solar con sistemas PV (fotosíntesis técnica) con una eficiencia de 10%; y mediante sistemas termoquímicos y energía solar con eficiencias de 20%. Esto, además, ayudaría a mitigar la controversia existente sobre las inmensas superficies plantadas para producir biocombustibles. Un gran obstáculo, sin embargo, es su alto precio.

En la UTFSM se realizó una tesis de celda de combustible el año 2004 y cuatro tesis de generación de gas de síntesis desde el año 2016, en adelante.

8. CONCLUSIONES PARA EL DESARROLLO DE LA ENERGÍA SOLAR EN CHILE

Los estudios que terminaron de convencer a los escépticos de la influencia antropogénica y su peor consecuencia, el calentamiento global de nuestro planeta, son múltiples. En este sentido, y para frenar este avance, el uso eficiente y masificado de la energía solar es clave. Por ello, muchos países ya han fijado como meta que, para el año 2050, la energía solar sea la principal fuente energética de su matriz. Si en el pasado el impulso provino de la crisis del petróleo, ahora la motivación medioambiental ha llevado a acelerar el desarrollo de tecnologías que convierten la radiación solar en energía utilizable por el ser humano.

Ella tiene el mayor potencial de todas las fuentes de energía conocidas. Como ha concluido el IPCC²¹, su difusión dependerá fuertemente de las políticas energéticas, el aporte del Estado, situaciones políticas estables y las mejoras tecnológicas, que se traducen en una reducción de los costos energéticos de las tecnologías solares (conocido como LCOE²² por sus iniciales en inglés, *levelized cost of energy*).

Estos costos LCOE varían mucho dependiendo de la ubicación geográfica, las rebajas o aportes estatales y de los costos locales de las tecnologías. Se espera que, con el desarrollo tecnológico, bajen drásticamente los precios²³, en especial los de las centrales térmicas solares (CSP), dada su alta capacidad de producción de energía eléctrica, su potencial de desarrollo y la investigación que hoy se centra en este tipo de tecnología. En la actualidad, el mayor desafío es almacenar energía térmica para la producción de energía eléctrica durante las horas sin radiación. A largo plazo se vislumbra el uso

²¹ *Intergovernmental Panel on Climate Change*, 2011.

²² El costo nivelado de la energía (LCOE) es una medida de una fuente de energía que permite la comparación de diferentes métodos de generación de electricidad de manera constante. Es una evaluación económica del costo total promedio para construir y operar un activo generador de energía durante su vida útil, dividido por la producción total de energía del activo durante esa vida. El LCOE también puede considerarse como el precio mínimo promedio al que se debe vender la electricidad para compensar la vida útil del proyecto.

²³ *Intergovernmental Panel on Climate Change*, 2011.

de combustibles solares para aplicaciones en el transporte aéreo y terrestre, tecnología que está en proceso activo de investigación y en etapa de análisis en plantas pilotos.

Por otra parte, queda claro que la ubicación geográfica influye de manera importante en el tipo de tecnología con mayor potencial de desarrollo. En este sentido, Chile es un país privilegiado, pues cuenta con las condiciones para desarrollar toda la gama de tecnologías solares que se han descrito en este capítulo. Sin embargo, en diversas oportunidades podemos observar colectores solares sobre techos de viviendas mal orientados, o con sombra durante períodos clave del día. Si bien este privilegio en las condiciones de radiación permite que aun así estas tecnologías funcionen, se evidencia una ineficiencia energética. Este ejemplo, entre otros, nos permite acentuar la relevancia de políticas sociales que se vinculen y actúen en conjunto con el impulso a la acumulación de capacidades tecnológicas en energía solar.

Los ejemplos tomados de las tesis y proyectos realizados en y por la UTFSM muestran desarrollos tecnológicos situados en nuestro territorio, que evidencian, tanto un significativo aprendizaje, como demostraciones de que su uso es posible y beneficioso. La larga experiencia de esta casa de estudios muestra un trabajo sistemático, en el que no solo se profundiza en la teoría de la energía solar, sino que hay experimentación, procesos de optimización, de obtención de curvas características, estudios del comportamiento de las tecnologías en nuestro país, estudios de factibilidad económica, entre otros. Cabe hacer notar que la experiencia de la UTFSM es solo parte de toda la actividad de investigación y desarrollo que se realiza en el país. Además de las universidades y del sector privado que comenzó a formarse en los años ochenta, en el nuevo siglo se han unido importantes centros de investigación, como SERC Chile, y se han multiplicado los actores privados.

Como en todos los proyectos de innovación, las nuevas tecnologías no nacen óptimas; existen fracasos y la implementación es normalmente problemática. Sin embargo, esto es parte del desarrollo y aprendizaje para realizar mejoras. Los investigadores chilenos han

sido y son parte de la creación de soluciones para estos desafíos. El trabajo en energía solar en Chile, como se ha visto a lo largo del capítulo, ha sido innovador y visionario, ya que la mayoría de las tecnologías solares emergentes a lo largo de la historia solar ha sido estudiada, e incluso se han realizado optimizaciones en algunas aplicaciones.

Las investigaciones realizadas en Chile han usado distintos métodos, valiéndose tanto de medios experimentales como de medios computacionales, modelos y simulaciones. Además, las investigaciones y las aplicaciones se realizaron a menudo en colaboración o alianza con otras instituciones, incluyendo a organismos públicos y privados, nacionales e internacionales. En ello, la generación de capacidades con conciencia de su importancia para la difusión tecnológica ha sido clave.

El estudio y desarrollo de las tecnologías, para que sean más confiables y económicas, es relevante. Pero también es importante que los países generen leyes estables con respecto al uso de energías renovables, además de regulaciones y estándares para el desarrollo y uso de esas tecnologías. En la creación de estas regulaciones técnicas, es importante que participen investigadores e ingenieros. La UTFSM se ha involucrado en procesos regulatorios justamente porque reconoce su importancia. Así, por ejemplo, Pedro Roth participó en la generación de las normas NCh2903/3-2004 y la NCh2911/2-2005.

Volvemos a la conclusión del IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) sobre la relevancia de la difusión de la energía solar en las políticas energéticas, el aporte del Estado, la estabilidad de las políticas públicas y las mejoras tecnológicas. Tendríamos que agregar que entre las mejoras tecnológicas se incluyen también el desarrollo de capacidades locales, el conocimiento de las condiciones propias del país y del comportamiento de la radiación solar en su geografía, así como la capacidad de desarrollar, adaptar y mantener las tecnologías.

El recorrido por las aplicaciones potenciales de la energía solar y la historia de los estudios y avances realizados en la UTFSM son solo una muestra de todo lo que se ha hecho en Chile. Por lo tanto,

podemos concluir que no ha faltado talento ni capacidad para relacionarse, como pares, con otros centros tecnológicos del mundo. Tampoco les ha faltado visión a los investigadores y desarrolladores, ni interés en formar nuevas generaciones de ingenieros solares. Entonces, el lento y humilde desarrollo de la industria solar chilena quizás se explica por los otros factores señalados por el IPCC. Ha faltado —aún falta— la acción decidida del Estado. Hay aspectos positivos y avances pero, para logros mayores, se necesitan esfuerzos más grandes.

CAPÍTULO 5

PROPUESTAS Y RESULTADOS: LA PARADOJA DEL PAÍS CON LA MAYOR RADIACIÓN SOLAR DEL MUNDO QUE DESCARTÓ LAS TECNOLOGÍAS PARA APROVECHARLA (1958-2011)

*Nelson Arellano Escudero**

INTRODUCCIÓN

Las iniciativas solares en Chile han tenido una trayectoria que se remonta al siglo XIX. Con cierta intermitencia estuvieron presentes también en el siglo XX. Luego, durante la segunda mitad de ese siglo, ocurrió la búsqueda más activa de alternativas en ciencia y tecnología para el conocimiento y aprovechamiento de la radiación solar. En la segunda década del siglo XXI, es posible observar cómo la crisis ambiental y el marco coevolutivo de valores e innovación tecnológica han propiciado un resurgimiento del interés por la cosecha de la radiación solar.

Este panorama es el que alienta este capítulo, situado en el campo de la explicación cultural para el problema tecnoambiental

* Universidad Academia Humanismo Cristiano – DETLA; Fondecyt Iniciación No. 11180158 (2018-2021): «Las fronteras solares de Chile: desierto, Antártica, Polinesia y espacio. Una historia de gobernanza y valores sociales de tecnologías solares en zonas extremas (1976-2011)»; Este capítulo ha contado con el apoyo de SERC Chile, FONDAP/CONICYT No. 15110019

de la cosecha de radiación solar. Para ello es necesario recordar que desde el siglo xix el desierto de Atacama fue un escenario prolífico en términos de soluciones técnicas en energía solar, para el uso de herramientas de escala industrial, capaces de contribuir a la gestión de procesos productivos.

Sin embargo, en la década de 1970 ya existía una acumulación de información técnica que sostenía que la zona de cobertura debía extenderse hasta, al menos, Curicó (ciudad situada en los 35° de latitud sur). Con el paso de los años se fue demostrando que el uso de distintas tecnologías solares era apropiado para variados propósitos según las geografías respectivas, incluyendo la Antártica¹.

Sin embargo, durante las décadas de 1980 y 1990, las políticas públicas no se centraron en el desarrollo intensivo de la energía solar en escala regional, nacional ni internacional. Tal como había sucedido en décadas previas, se observó también una falta de sincronía entre la actividad académica, el desempeño estatal y la regulación de los mercados. La labor académica se mantuvo muy concentrada en las acciones de las actuales regiones de Antofagasta y Valparaíso; allí se fue capaz de incidir en la formación de jóvenes ingenieros e investigadores y generar innovación en energía solar. En la Universidad de Chile hubo docentes interesados en aspectos del desarrollo solar que tendieron a interpelar lineamientos de la política pública y, en menor medida, a la investigación y desarrollo.

Por su parte, el Estado mantuvo un seguimiento constante a las posibilidades de desarrollo técnico con radiación solar para fines energéticos. Desde la década de 1960, la Empresa Nacional de Electricidad (Endesa) incorporó en sus informes para la Corporación de Fomento de la Producción (Corfo), la necesidad de persistir en la evaluación de los progresos en investigación y desarrollo de energía solar².

¹ Ver, por ejemplo, Robert Nelson, «A brief history of thermophotovoltaic development», *Semiconductor Science and Technology* 18: 5 (2003): 141.

² Oficina de Planificación de Endesa, *Minuta. Utilización de la energía solar para calentar agua para usos domiciliarios*. Oficio No. 3, 9 de enero de 1973. Archivo del Laboratorio de Energía Solar Julio Hirschmann Recht, Universidad Tecnológica Federico Santa María, Valparaíso.

En las décadas de 1960 y 1970 se realizaron diversas propuestas para el desarrollo de la energía solar. En ello, es preciso considerar que, en cuanto a la industria salitrera, los cambios tecnológicos incidieron en la consolidación de los mercados del potasio y el inicio de la exploración de pozas de evaporación solar para la obtención de litio (que recién alcanzaría un régimen productivo en la década de 1980).

Durante la segunda mitad del siglo xx destacó el diseño de pozas de evaporación solar elaborado por Edgar Stanley Freed, fallecido en 1950. Estas pozas se ubicaron en Coya Sur, de la Compañía Chilena Anglo Lautaro que pasaría a llamarse Sociedad Química de Chile (Soquimich), y que durante un breve período —gobierno de la Unidad Popular y primeros años dictatoriales, es decir, entre 1970 y 1980, aproximadamente— fue una empresa estatal.

Asimismo, en la década de 1970 se encontraban en proceso de formación los, probablemente, primeros dos doctores chilenos en el campo de la energía solar. Uno de ellos fue el Dr. Orlayer Alcajaga, que participó en programas de formación del Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS, Francia) y en la Università di Bologna (Italia), patrocinado por el Dr. Giorgio Nebbia. Por otra parte, el Dr. Roberto Corvalán desarrolló su investigación doctoral en la Universidad Autónoma de Madrid, al alero del grupo del Dr. José Doria que, aunque se concentraba en las tecnologías fotovoltaicas, acogieron su proyecto termosolar. A su regreso, Orlayer Alcajaga se mantuvo trabajando en labores de investigación en energía solar en Antofagasta, mientras que Roberto Corvalán no encontró acogida a su propuesta de utilización de radiación solar para el secado de madera, por lo que se encaminó a una especialización en temas relativos a la contaminación atmosférica³.

Los últimos 25 años del siglo xx representaron un período difícil para el desarrollo de la energía solar, aunque en la práctica algunos investigadores, como el ingeniero Roberto Román, persistieron en

³ Roberto Corvalán, *Secado de madera mediante el aprovechamiento de la energía solar*, tesis para optar al grado de doctor por la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales (Universidad Politécnica de Madrid, 1985).

sus esfuerzos. Por su parte, ya se había consolidado el uso de la evaporación solar para obtención de subproductos del salitre. Sin embargo y a partir de ciertas tensiones, la tentación más evidente es calificar las últimas décadas del siglo pasado como un período carente de iniciativas, supuesto que aquí podremos desmentir.

El ambiente político de la dictadura y de los primeros años de la transición a la democracia no fue favorable para las propuestas de las tecnologías socialmente apropiadas (TSA) y la protección del medio ambiente. Aun así, el campo de las tecnologías de la energía solar mantuvo un ritmo de despliegue acorde a sus circunstancias. Se priorizaron otras fuentes de energía, como los hidrocarburos y la hidroeléctrica, que resultaban imposibles de alcanzar con la precaria inversión existente en investigación y desarrollo en energía solar.

Además de los centros de investigación en Valparaíso y Antofagasta, desde la década de 1960 participaron investigadores de la Universidad de Chile, como Angelo Filipponi, Jacques Fournier, Roberto Román y Roberto Corvalán. Algunas de las gestiones realizadas hasta 1973, como la 20 Reunión de la Asociación Chilena de Energía Solar Aplicada (ACHESA) efectuada en el mes de mayo, tuvieron continuidad en otra escala y condiciones. Entre ellas se puede mencionar la realización del denominado Primer Seminario Nacional de Energía Solar y Eólica, entre el 31 de julio y el 4 de agosto de 1978, en el campus Lo Contador de la Universidad Católica, en Santiago de Chile.

Las experiencias domiciliarias termosolares no llegaron a sobrepasar las instancias de los prototipos y la investigación en los laboratorios universitarios, es decir, se mantuvieron a un ritmo menor que en las décadas anteriores. Aun así, la investigación nunca cesó, a pesar del alejamiento de figuras insignes como Julio Hirschmann y Carlos Espinosa. Los cambios tecnológicos en los procesos de medición de radiación solar representaron, probablemente, la segunda de las transiciones de mayor alcance en el lapso de la gran aceleración económica⁴. Lo anterior se observa al considerar que la investigación

⁴ Will Steffen et al., «The trajectory of the Anthropocene: the great acceleration», *The Anthropocene Review* 2: 1 (2015): 81-98.

y el desarrollo enfocados en las tecnologías fotovoltaicas han tenido su mayor expansión en cuanto impacto en la modificación de las matrices energéticas de la electricidad⁵. Sin embargo, el uso de la radiación solar para la evaporación y cristalización fraccionada fue la industria solar con mayor impacto económico para la producción de sales, concentrando la atención en el potasio, el magnesio y el litio.

Este proceso desigual, en términos evolutivos, de las líneas técnicas termosolares y fotovoltaica merece un estudio detenido que supera los alcances de este capítulo. Pero los antecedentes que se presentan aquí se agrupan como punto de arranque de la reflexión que hace posible la reunión de elementos técnicos, económicos, políticos y culturales.

Por todo lo anterior es que nos concentramos en dos campos de la labor solar en Chile en la segunda mitad del siglo xx y tocando, a veces, el siglo xxi. En primer lugar, presentaremos la radiación solar domiciliaria y su aprovechamiento a través de los artefactos de la vida cotidiana; en segundo lugar, se verán tres casos de relación entre el Sol y la industria: centrales de potencia, pozas de evaporación solar y fotovoltaicas.

Estas historias, vistas como conjunto, dejan de manifiesto el esfuerzo, interés y logros de un grupo de ingenieros y técnicos empeñados en la investigación y desarrollo solar. Quizás, esto demuestra que la innovación era una práctica en el país con la región de mayor radiación solar del mundo.

RADIACIÓN SOLAR DOMICILIARIA: ARTEFACTOS DE LA VIDA COTIDIANA

Una de las dimensiones que debiera despertar un interés especial es el de los usos domiciliarios de la energía solar. Tenemos aquí un punto para el análisis crítico del desempeño cultural de las distintas poblaciones y comunidades situadas en un territorio extremadamente

⁵ M. Hosenuzzaman et al., «Global prospects, progress, policies, and environmental impact of solar photovoltaic power generation», *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 41 (2015): 284-297.

rico en un recurso o, más bien, que cuenta con un servicio ecosistémico excepcional en el mundo⁶.

Algunas investigaciones han visibilizado las contribuciones de inventores e inventoras que produjeron, a fines del siglo xix, artefactos y herramientas movilizadas por energías renovables entre las que se incluía, por supuesto, la energía solar⁷. Esto permite cuestionar a quienes han sostenido la imagen de un país sin inventiva ni innovadores, y nos hace replantear las búsquedas de usos energéticos. El relato industrial, que ha sido la materia de discusión e interés en la historia política y económica, puede ser revisitado al preguntarse cuánta radiación solar moviliza los quehaceres de la vida cotidiana.

Una de las preguntas más evidentes es: si la radiación solar en el territorio del Estado de Chile es abundante, ¿por qué la población no llegó a desarrollar una cultura técnica para su aprovechamiento? Sin embargo, se puede plantear la pregunta en un sentido opuesto: ¿qué sabemos del uso de la radiación solar por parte de la población local en la vida cotidiana? En ambos casos tenemos más incógnitas que respuestas. Aquí apenas trazamos algunos primeros bocetos con datos iniciales, a través del caso Somela, con la fabricación de paneles y sus esfuerzos para la divulgación de cocinas solares.

Tanto en la fabricación de paneles como de cocinas solares disponemos de un pequeño grupo de datos. Un documento de cinco páginas fechado en Santiago de Chile el 9 de enero de 1973, contiene un cálculo del ahorro en dinero que significaría, para el Estado chileno, el estímulo a la incorporación de artefactos capaces de calentar agua con el uso de energía solar. Este oficio, titulado «Utilización de

⁶ A diferencia de la llamada teoría económica clásica, que entiende al planeta como un *stock* de elementos potencialmente disponibles para los mercados en forma de mercancía, dinero o capital, la economía ecológica visibiliza un metabolismo planetario, una nueva naturaleza o una producción primaria (geológica, de fotosíntesis, etcétera) que aporta servicios ecosistémicos utilizados por agentes humanos y no humanos. Ver, por ejemplo: Karl-Heinz Erb et al., «Embodied HANPP: Mapping the spatial disconnect between global biomass production and consumption», *Ecological Economics* 69: 2 (2009): 328-334.

⁷ Bernardita Escobar y Nelson Arellano, «Green Innovation from the Global South: Renewable Energy Patents in Chile, 1877-1910», *Business History Review* 93: 2 (2019): 379-395.

la energía solar para calentar agua para usos domiciliarios», alude a las posibilidades de reemplazar el «agua caliente proveniente de calefón a gas licuado o bien termos eléctricos»⁸.

La minuta menciona directamente a la Asociación Chilena de Energía Solar Aplicada (ACHESA), lo que indica que existía cierta colaboración entre el mundo industrial y el académico. Por otra parte, el estudio de factibilidad de uso de energía solar para usos domiciliarios resulta coincidente con las investigaciones y propuestas que se generaban en Europa en la misma época a través de la *Coopération Méditerranéenne Pour L'Énergie Solaire* (COMPLES) y las regulaciones energéticas de algunos países de la cuenca del Mediterráneo⁹. La minuta emitida por la Oficina de Planificación de la Empresa Nacional de Electricidad Sociedad Anónima, por ese entonces con un 97,93% de sus acciones en propiedad de Corfo, estimó el número de calentadores de agua en uso basado en el censo de vivienda de 1960 y proyectó un aumento en el número de viviendas con agua potable caliente para 1975, dado que para 1960 se calculaba que el 33% de las viviendas disponían de agua potable caliente.

En función de ello, la Oficina de Planificación calculó el ahorro de divisas, es decir, en base a los precios calculados en dólares de Estados Unidos llegó a concluir que el ahorro neto de divisas se acercaría a los dos millones de dólares (equivalentes a $\text{mus}\$ 6$ de 2019¹⁰). Estas conclusiones se alinean con las investigaciones de Julio Hirschmann, realizadas durante la década de 1960¹¹. En la Universidad Técnica Federico Santa María, Hirschmann avanzó en dirección a habilitar utensilios domésticos solares, tal como se

⁸ Oficina de Planificación de Endesa, *Minuta. Utilización de la energía solar para calentar agua para usos domiciliarios*, Oficio No. 3, 9 de enero de 1973. Archivo del Laboratorio de Energía Solar Julio Hirschmann Recht, Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso.

⁹ Yves Bouvier y Léonard Laborie, dir., *L'Europe en transitions. Énergie, mobilité, communication. XVIIIe-XXIe siècles* (Paris: Nouveau Monde Éditions, 2016).

¹⁰ Según los cálculos de <https://www.usinflationcalculator.com>

¹¹ Su exploración también incorporó otras fuentes energéticas que no eran la solar: Julio Hirschmann, «Sobre las posibilidades de aprovechar la energía geotérmica en Chile», *Scientia* 21: 1 (1954): 25-43. Julio Hirschmann, «Clasificación de reactores nucleares de fisión», *Scientia* 23: 3 (1956): 158-173.

observa en su publicación: «Consideraciones sobre el consumo de energía de nuestro país»¹².

Para 1959, en la misma revista *Scientia* se divulgaba la tesis de Víctor Bocić Arzić donde analizó, entre otras tecnologías, los colectores solares. Bocić describió su funcionamiento:

«[...] el colector tiene por objeto acumular la energía solar con el fin de subir la temperatura de la sustancia de trabajo. En el colector se puede lograr temperaturas tan altas como se desee, siendo su máximo teórico la temperatura misma de la superficie solar, pero en la práctica, su temperatura está limitada por factores económicos y constructivos.

La temperatura alcanzada no es el único factor que interesa para determinar la calidad de un colector. De gran importancia son, además, la cantidad de calor acumulada y la diferencia entre las temperaturas de entrada y salida de fluido o sustancia de trabajo en el colector.

Los colectores solares pueden clasificarse en dos grandes grupos: a) colectores planos, y b) colectores con concentración óptica de radiación. En ambos tipos pueden distinguirse aún colectores fijos y colectores móviles, según se tengan o no sistemas destinados a seguir el movimiento aparente del Sol. Entre los colectores móviles podemos encontrar reflectores con uno o dos ejes de rotación»¹³.

Siete años más tarde, el domingo 18 de diciembre de 1966, *El Mercurio de Valparaíso* publicó una nota titulada: «Edificio pionero en uso de energía solar en Valparaíso». En ella se señalaba la construcción de este edificio en el Cerro Concepción.

«El más revolucionario edificio de Sudamérica, proyectado para la instalar en todos sus departamentos sistemas de agua caliente empleando energía solar, será inaugurado en fecha próxima en Valparaíso. De este modo se cumple una vez más la tradición, por tantos años mantenida, de que desde el primer puerto de la República nazcan iniciativas con miras al

¹² Julio Hirschmann, «Consideraciones sobre el consumo de energía de nuestro país», *Scientia* 16: 75 (1949): 15-36.

¹³ Víctor Bocić, «Posibilidades de utilizar la energía solar», *Scientia* 26 (1959): 65-97.

futuro y que benefician no solo a los habitantes de la ciudad, sino a los del país entero. Los equipos termosolares han sido instalados en la losa que sirve de techumbre al edificio ‘Papudo’, del cerro Concepción cuyos tijerales se realizaron ayer y constituye el segundo de tres cuerpos de departamentos que construye en dicho cerro la firma Coviet Limitada. De estos se encuentra ya habilitado el ‘Gervasoni’ que está frente al ascensor y en un futuro inmediato se iniciará la construcción del edificio ‘Templeman’»¹⁴.



::: Termopaneles SOMELA. Fecha no conocida y ubicación no determinada.
Fuente: Archivo del Laboratorio Solar, UTFSM

¹⁴ *El Mercurio de Valparaíso*, «Edificio pionero en uso de energía solar en Valparaíso», domingo 18 de diciembre de 1966.



::: Imagen de la maqueta del Conjunto Coviet en Cerro Concepción, con Edificio Gervasoni en segundo plano. En su terraza, los termopaneles
Fuente: Archivo del Laboratorio Solar, UTFSM

Al observar estas iniciativas de décadas atrás, resulta bastante evidente que el Decreto 255 del Ministerio de Vivienda y Urbanismo, publicado en enero de 2007, llegó muy tarde. Él busca incorporar la tecnología termosolar a las viviendas a través de un subsidio, de manera de fomentar su uso. Debiéramos comparar estos proyectos con trayectorias como la del Israeli National Laboratory, la creación del Organic Rankine Cycle Turbine y, en especial, la historia de la NerYah Company. En 1953, esta última lanzó el primer prototipo de calefactor solar diseñado por el ingeniero y propietario de la empresa Levi Yissar¹⁵. No obstante, en Israel se legisló para obligar a la incorporación de calefactores de agua solares en las nuevas construcciones recién en 1980.

¹⁵ Wei Li, Tzameret Rubín y Paul Onyina, «Comparing solar water heater popularization policies in China, Israel and Australia: the roles of governments in adopting green innovations», *Sustainable Development* 21: 3 (2013): 160-170.

La situación con las cocinas solares, sin embargo, ha sido totalmente diferente¹⁶. Una serie de investigadores e investigadoras desarrollaron un amplio número de experimentaciones y crearon una gran variedad de modelos de cocinas solares. En Chile, aunque la tendencia para extender el uso de cocinas solares ha sido similar, no se ha encontrado una recepción acorde a las posibilidades físico-químicas que ofrece la alta radiación solar disponible es una amplia zona del territorio¹⁷.

Al calcular el uso de cocinas solares en términos de emisiones atmosféricas, la proyección es auspiciosa:

«En el caso de Villaseca, con únicamente 60 familias utilizando la cocina solar durante diez años, se ha evitado la emisión a la atmósfera de 3,538,270 toneladas (3.54 Gg) de CO₂, 9,880 toneladas de CH₄, 132 toneladas de N₂O, 164,662 toneladas de CO, 19,759 toneladas de COVDM y 3,293 toneladas de NO_x»¹⁸.

La cocción solar es probablemente uno de los procesos que mejor revela la desafección de la cultura local con las posibilidades de los artefactos que cosechan la radiación solar. Una visión crítica de los valores sociales deja en evidencia la discontinuidad entre los ritmos de la vida diaria de las personas y las comunidades con respecto a las herramientas que se utilizan para resolver los desafíos de la «invención de lo cotidiano»¹⁹. Hasta donde ha sido posible indagar, en Chile no han existido intentos de producción de cocinas

¹⁶ E. B. Kapstein, «The solar cooker», *Technology and Culture* 22: 1 (1981): 112-121; N.L. Panwar, S. C. Kaushik y S. Kothari, «State of the art of solar cooking: An overview», *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16: 6 (2012): 3776-3785.

¹⁷ Alfredo Esteves y Roberto Román, eds., *Libro de cocción solar (Ricsa-Cyted)* Red Iberoamericana de Cocción Solar de Alimentos, CYTED, Disco compacto ISBN 987-20105-3-6 (Salta: Inenco, 2003). Pedro Serrano-Rodríguez, *Uso de cocinas solares y sus impactos en la comunidad de Villaseca*, trabajo final de máster del programa Gestión y Promoción del Desarrollo Local (Universitat Jaume I, 2011).

¹⁸ Esteves y Román. *Libro de cocción solar*, 12.

¹⁹ Michel De Certeau, *La invención de lo cotidiano* (Ciudad de México: Iberoamericana, 2010).

solares que permitiesen su comercialización, como sí ocurrió con los calefactores de agua.

Como podemos ver, en las dos situaciones relacionadas con la cosecha de energía solar a escala domiciliaria, se ha podido constatar aproximaciones de diversa magnitud, pero ambas dejan en evidencia la débil vinculación de la sociedad y su cultura local con las herramientas de la energía solar. Esta situación, no obstante, requiere un estudio profundo y una reflexión que articule dimensiones filosóficas, culturales, económicas e ingenieriles.

De cualquier manera, la ambivalencia de los actores sociales en Chile con respecto a la energía solar queda todavía más patente en la relación entre Sol e industria.

EL SOL Y LA INDUSTRIA

Podemos situar la evolución de los usos de la energía solar en la industria en Chile en varias líneas técnicas. En este apartado se presentan tres de esas iniciativas, que han tenido desarrollos dispares entre sí: las pozas de evaporación solar²⁰, las centrales de potencia²¹ y el uso de las fotovoltaicas.

Pozas de evaporación

Las pozas de evaporación consisten en piscinas con forma de rectángulos de una capacidad de aproximadamente 40 mil metros cúbicos. Se llenan con agua salina y, mediante la evaporación por energía solar, permiten separar por cristalización el sulfato de sodio y otras sales. A este procedimiento se le llama *cristalización fraccionada*.

²⁰ Nelson Arellano, «La energía solar industrial en el desierto de Atacama entre 1933 y 1952: investigación, desarrollo y sustentabilidad», *Estudios Atacameños* 57 (2018): 119-140.

²¹ Nelson Arellano, «MIT, Universidad de Barcelona, Corfo y Batelle Institute: búsquedas paralelas del poder solar en la década de 1970», *Quaderns d'història de l'enginyeria* 16 (2018): 261-276.

El desierto de Atacama parece haber sido el tercer sitio en el mundo donde se implementó esta técnica. El proceso de cristalización fraccionada permitía la obtención de subproductos del salitre (como litio, yodo y potasio, entre otros). Ello comenzó a ser estudiado en la década de 1930, aparentemente en la Oficina Los Dones, en Atacama. No fue sino hasta fines de la década de 1940 que se concretó el diseño del ingeniero Stanley Freed, quien alcanzó a ver construidas cuatro de las primeras 10 pozas de evaporación solar proyectadas. En 70 años, la utilización de esta técnica no solo se incrementó en superficie y producción en escala exponencial, sino que amplió su utilización desde la cosecha de magnesio, potasio y otras sales, al litio. Los primeros experimentos se realizaron hacia fines de la década de 1970, aunque diversas pruebas ya se habían realizado en décadas anteriores.

El caso de las pozas de evaporación es muy interesante en relación con la historia de la tecnología en Chile y los modos de administración de la memoria en la cultura local. Se debe destacar que este desarrollo técnico fue divulgado a través de la prensa y que su existencia fue resaltada incluso por el entonces candidato a la presidencia de la República, Eduardo Frei Montalva. El fallecimiento de Stanley Freed fue también parte de los contenidos tratados en diarios locales en el Norte Grande, en Santiago y en la versión latinoamericana de la revista estadounidense *Time*²², dando a conocer su obra.

No obstante, la memoria en torno a este hito se fue diluyendo al punto que el análisis del aporte técnico no ha obtenido la atención que merece. Las pozas de evaporación solar son artefactos complejos que deben lidiar con los fenómenos astrofísicos de la radiación solar en el desierto de Atacama y otros fenómenos atmosféricos. Debido al diseño de esas instalaciones, de gran extensión, al aire libre, ellas deben enfrentar las condiciones del lugar más árido del mundo y la sismicidad de la zona. Debe añadirse que la observación crítica hecha por Julio Hirschmann en la década de 1960, con respecto a la pérdida termodinámica total en el proceso de evaporación, que debe

²² «Chile. New life in the desert», *Time. The weekly Newsmagazine*, April 28, 1956.

ser estudiada con una perspectiva de sustentabilidad del siglo xxi, tiene connotaciones distintas en función del conocimiento reciente de los efectos antrópicos.

Centrales de potencia

El ciclo de Rankine es el diseño que habitualmente sirve de base para el funcionamiento de las centrales térmicas, las que producen hoy la mayor parte de la energía eléctrica que se consume en el mundo. La evolución de las centrales térmicas ha estado condicionada por la búsqueda de mejoras en el rendimiento térmico del ciclo termodinámico, ya que incluso pequeñas mejoras en el rendimiento significan grandes ahorros en los requerimientos de combustible. La idea básica detrás de todas las modificaciones para incrementar el rendimiento de un ciclo de potencia es aumentar la temperatura promedio a la cual el calor se transfiere al fluido de trabajo en la caldera, o disminuir la temperatura promedio a la cual el fluido de trabajo cede calor al condensador²³. Este diseño tiene una historia cuyo inicio se puede situar en el siglo xix, aunque muchas obras de divulgación aluden a técnicas de concentración a lo largo de toda la historia occidental.

En Chile, el inicio de operaciones de las primeras centrales de potencia se proyecta para el año 2021. Sin embargo, sus posibilidades técnicas fueron establecidas en Europa con el proyecto Helios de mediados del siglo xx²⁴. La figura de Felix Trombe y el horno solar de Fourniel se conectan con la visita de este investigador francés al desierto chileno. En esa oportunidad Trombe se reunió con sus pares en las universidades Federico Santa María y del Norte para, posteriormente, emitir un informe de factibilidad de centrales de

²³ Hernán Garrido, *Dinámica de estanques acumuladores en centrales solares*, tesis para optar al grado de licenciado en Ingeniería Civil Mecánica (Santiago: Universidad de Chile, 2018).

²⁴ Bouvier y Laborie, *L'Europe en transitions...*

potencia en el norte de Chile. Aquel fue el resultado de la consultoría para la cual se contrató al Battelle Centre de Recherche de Gêneve²⁵.

En este informe se propusieron criterios de búsqueda de emplazamiento de centrales de potencia capaces de alimentar de electricidad al Sistema Interconectado del Norte Grande. Como resultado se ofreció una conclusión teórica de las posibilidades de construcción y puesta en marcha de centrales de potencia para la producción de energía eléctrica, por supuesto, en las escalas de aquel tiempo. La consultoría, financiada por Corfo, no llegó a concretar ningún proyecto y el documento permaneció en la biblioteca de la Corporación de Fomento.

En un segundo plano, la existencia de ideas de proyecto, ingeniería conceptual e incluso ingeniería de detalle, son todos parte de un proceso que debe ser visto globalmente o como conjunto de aproximaciones sucesivas a la solución de un problema técnico. En este sentido, el imaginario acerca de la *solución tecnológica*²⁶ queda develado en el caso chileno: el deseo de conseguir efectos en el mediano y corto plazo parecen haber sido grandes barreras para la eficiencia. Pero una matriz de cálculo más compleja podría haber incorporado la degradación de energía y materia que implican las fuentes pasajeras, como son las provenientes de los hidrocarburos. Esto, por supuesto, requiere un análisis en una escala temporal que no resulta admisible a las economías centradas en la crematística.

Fotovoltaicas

Al hablar de energía fotovoltaica nos referimos, básicamente, al proceso mediante el cual la radiación solar se transforma en electricidad, transformación que se produce en los paneles fotovoltaicos.

Los principales centros universitarios de investigación en energía solar eran la Universidad Técnica Federico Santa María,

²⁵ Felix Trombe, *Estudio de factibilidad de centrales de potencia en el norte de Chile* (Gêneve: Battelle Centre de Recherche, 1976).

²⁶ Sean Johnston, «The Technological Fix as Social Cure-All: Origins and Implications», *IEEE Technology and Society Magazine* 37: 1 (2018): 47-54.

en Valparaíso, y la Universidad del Norte, en Antofagasta. Estas universidades tuvieron oportunidad de contar con elementos de las *thermocouples*²⁷ y algunas células fotovoltaicas en la década de 1960. Su experimentación de vanguardia, sin embargo, aparentemente no logró sobrepasar los límites de sus laboratorios.

A fines de la década de 1970, la investigación y desarrollo en paneles fotovoltaicos tuvo un impulso relevante en Europa y Estados Unidos, no así en América del Sur. Las indagaciones en el uso de silicio amorfo, sulfato de silicio y otros materiales se encontraban aún en niveles experimentales, por lo que todavía no arrojaban resultados apropiados para el prototipado y menos para la comercialización, a pesar de las manifestaciones en esa línea desarrolladas en España y otros países²⁸.

Por otra parte, en la investigación relativa a la carrera espacial, el interés por la energía solar fotovoltaica se mantuvo pues en el espacio exterior, es decir, fuera de la atmósfera terrestre, la única energía disponible es la radiación solar. Si bien en sus inicios la carrera espacial no incluyó energía solar, esto cambió, de modo que obtuvo particular atención hacia los años setenta.

Para el caso chileno esto es relevante, en tanto la Fuerza Aérea de Chile logró que en el año 2011 entrara en órbita el Satélite FASAT-Charlie, luego de dos intentos anteriores con FASAT-Alfa y FASAT-Bravo. En estos casos, ni hubo siquiera discusión en torno a qué tipo de tecnología se debía utilizar: debía ser energía solar.

En la superficie terrestre, sin embargo, las fotovoltaicas han debido sortear una serie de obstáculos institucionales, como se puede concluir a partir de los registros del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA). En ellos es posible observar el camino que ha debido construirse para que los proyectos solares logren entrar en operaciones durante el siglo XXI.

²⁷ Las *thermocouples* son artefactos eléctricos compuestos de dos conductores eléctricos disímiles, que funcionan a diferentes temperaturas. Como producto del efecto termoelectrico, la termocoupla produce voltaje dependiente de la temperatura (por ejemplo, se usan como termostatos).

²⁸ Arellano, «MIT, Universidad de Barcelona...»: 261-276.

Con todo, a pesar del optimismo que se ha instalado en relación con este nuevo tiempo de la evolución de las tecnologías de energía solar, no deben soslayarse los recuerdos y las memorias que, esta historia lo ha demostrado, tuvo momentos de auge y pujanza plagados de creatividad e innovación pero que, en casi todos los casos, luego de un tiempo de ejercicio quedaron en el olvido.

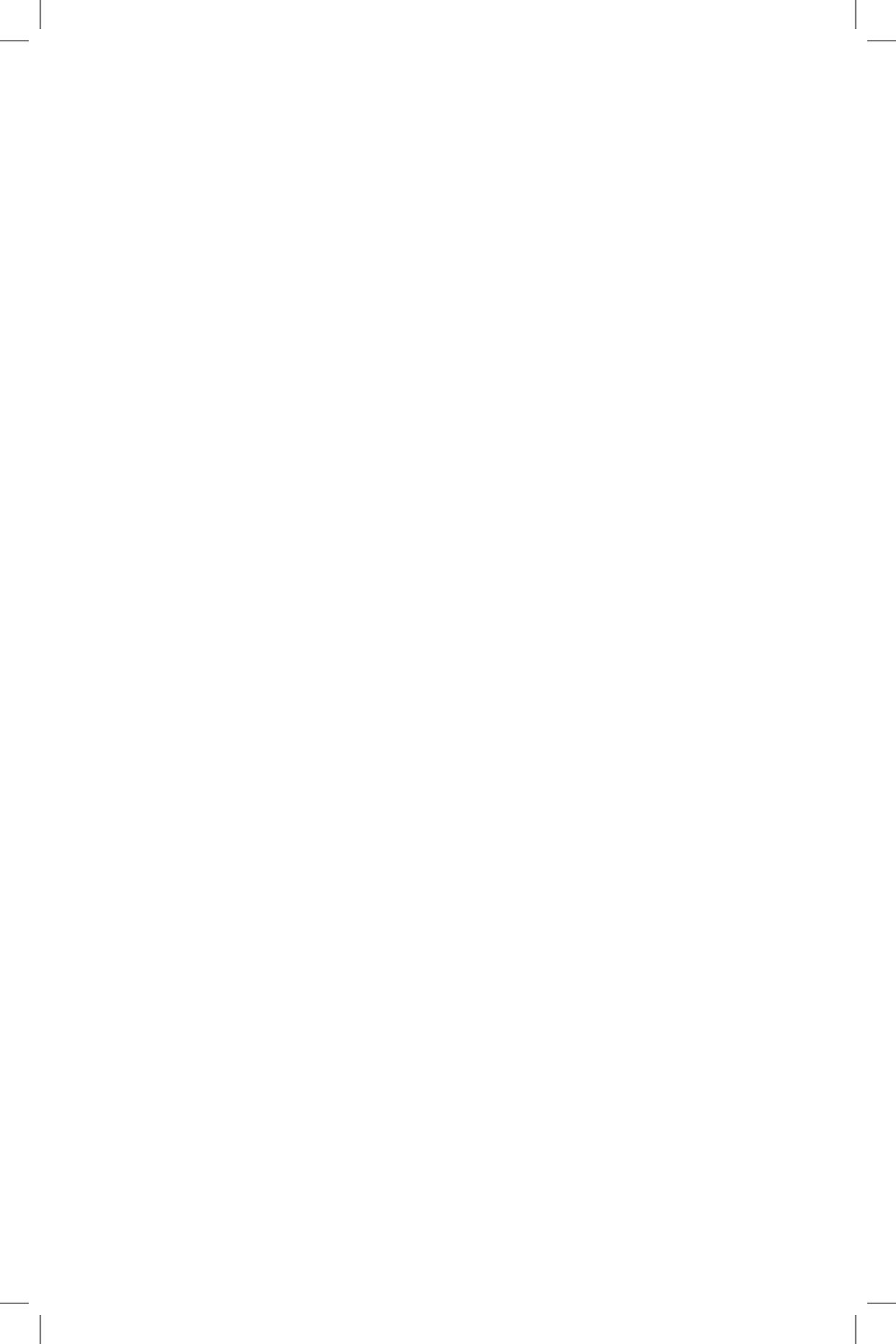
Tanto en la industria como en la vida cotidiana es posible afirmar que el mayor de los obstáculos nunca ha estado en la búsqueda de soluciones o alternativas técnicas, sino en las barreras que los valores sociales imponen al Sol.

CONCLUSIÓN

Entre 1958 y 2011 se activó un conjunto de investigaciones y acciones que elaboraron diseños, prototipos y laboratorios y utilizaron instrumentos de medición de la radiación solar y las condiciones meteorológicas que interactuaban con ella. La acumulación de datos permitió ratificar las mediciones realizadas desde inicios del siglo xx por el Observatorio Astrofísico del Smithsonian Institute: en el desierto de Atacama se encuentra el punto de mayor radiación directa del planeta.

Sin embargo, a pesar de la abundancia de este servicio ecosistémico —denominado *recurso natural* por el modelo económico capitalista— y la numerosa cantidad de propuestas y sus resultados, parciales o totales, el caso chileno se configura como la paradoja del país con la mayor radiación solar en el mundo que descartó las tecnologías para aprovecharla.

La progresión del desarrollo de tecnologías de energía solar en Chile es un ejemplo de los procesos evolutivos de las líneas técnicas. La evidencia reunida demuestra que no existe una trayectoria lineal que determine una lógica exclusiva en sus procesos de selección. En este mismo sentido, la historia tecnoambiental de la cultura local y la radiación solar requiere un estudio exhaustivo que amplíe y profundice el estudio de las racionalidades con las que han operado los actores, humanos y no humanos, en la era del Antropoceno.



CAPÍTULO 6

EL DESARROLLO DE LA ENERGÍA SOLAR EN CHILE, UNA VISIÓN INTEGRADORA

Roberto Román y Cecilia Ibarra***

1. INTRODUCCIÓN

Este capítulo tiene por objetivo reconstruir parte del desarrollo de la energía solar en Chile a partir de la perspectiva personal de los autores, entendidos como actores de algunas etapas de este proceso. Para ello, el capítulo se organiza en torno a hitos históricos identificados desde una visión que sitúa a la energía solar en un contexto económico, social y sectorial, tanto nacional como internacional.

La historia de la energía solar en Chile —parte de la ingeniería moderna— comenzó con el trabajo de Charles Wilson, presentado en el capítulo 2 de este libro. Tal como se establece allí, el impacto de Wilson es innegable, en la medida en que sabemos que él vendió al menos tres proyectos de desalinización de agua para producción industrial (por ejemplo, en la mina de plata Caracoles, la producción diaria era del orden de las 20.000 lt/día¹). Su trabajo fue una innovación exitosa en el sentido que tuvo un uso comercial y que inspiró a los pioneros solares chilenos del siglo xx, a pesar de la

* Universidad de Chile y SERC Chile, FONDAP/CONICYT N° 15110019

** Centro de las Ciencias del Clima y la Resiliencia (CR2), Universidad de Chile.

¹ Maria Telkes, «Solar Still», en *Proceedings of World Symposium on Applied Solar Energy* (Phoenix, Arizona, 1955), 73-79.

discontinuidad de su obra. Llamamos pioneros solares a los ingenieros solares chilenos que trabajaron en investigación y desarrollo entre 1957 y fines de los sesenta en varias universidades, entre quienes se cuenta a Carlos Espinosa, Germán Frick y Julio Hirschmann. El trabajo de Wilson fue un antecedente para que los pioneros solares aseguraran su convicción: es posible que la energía solar transforme la producción y la sociedad.

A pesar de la distancia temporal entre las desalinizadoras de Wilson y el trabajo de los ingenieros chilenos de los años cincuenta, el problema por solucionar seguía siendo abastecer de agua limpia a comunidades y cultivos. Este problema cobra vigencia en nuestros tiempos y vuelve a estar en el centro de los desafíos que tenemos por delante.

El desarrollo de la energía solar en Chile se ha caracterizado por esfuerzos asociativos y equipos multidisciplinarios que trabajaron en colaboración con otros grupos distribuidos a lo largo del país y en el extranjero. Como todo desarrollo científico y tecnológico, la energía solar ha evolucionado condicionada por circunstancias históricas, culturales, políticas y económicas. Así, por ejemplo, el golpe de Estado en Chile en 1973, la batalla por el petróleo y el rol de Estados Unidos en Medio Oriente marcaron el fin de una época enfocada en la investigación y desarrollo en las universidades, para dar inicio a otra, regulada por las leyes del mercado. Todo ello, lógicamente, incidió en el desarrollo de tecnologías asociadas a la producción energética y, por cierto, a la energía solar.

La comunidad de científicos e ingenieros solares en Chile y en el mundo ha estado alerta frente al fenómeno del cambio climático, al menos, desde los años setenta. El calentamiento de la Tierra y los problemas ambientales han motivado investigaciones y proyectos discutidos en los encuentros periódicos de las asociaciones del área. De algún modo, esta comunidad se adelantó al proceso de toma de conciencia generalizado y se fue preparando para ser parte importante en discusión y las posibles soluciones y transformaciones sociales necesarias relativas al problema del calentamiento global en Chile. Esperamos que la etapa actual sea la oportunidad para el desarrollo

de todo el potencial de la energía solar en Chile y el mundo, y que la comunidad solar siga desplegando su capacidad y preparándose para los desafíos venideros.

Este capítulo presenta la historia de la energía solar en Chile en cuatro fases: desde la década de 1950 hasta el golpe de Estado; luego, desde 1973 hasta los años ochenta; una tercera etapa de los años «dormidos», desde 1990 hasta 2006 y; por último, la época en desarrollo.

2. LOS PIONEROS Y LA CREACIÓN DEL COMITÉ SOLAR EN 1957: DESARROLLO EN LAS UNIVERSIDADES

La creación del Comité Nacional de Energía Solar en 1957 puede considerarse un hito en los inicios del desarrollo de la energía solar en Chile. En los años cincuenta ya había interés en el tema, al menos en la Universidad Técnica Federico Santa María (UTFSM), según se relata en el capítulo 4, también en la Universidad de Chile y en la Universidad Católica del Norte. Además, las favorables y excepcionales condiciones de radiación solar del norte del país ya eran conocidas en Chile y en el mundo. Las mediciones de Abbot, a las que se refiere el capítulo 3, habían contribuido a divulgar el potencial solar del desierto de Atacama.

El Comité Nacional de Energía Solar se constituyó el 14 de septiembre de 1957, en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Chile. La sede de la Universidad de Chile en la zona norte convocó a un encuentro científico y tecnológico de especialistas en energía solar², al que concurrieron representantes de la Universidad de Chile, la UTFSM, la Universidad Católica del Norte (en esa época, filial de la PUCV) y de la Pontificia Universidad Católica de Chile³.

² Sesión 14 de septiembre de 1957, pp. 1-4. Libro de Actas Comité Nacional de Energía Solar, Santiago, 1957. Archivo Personal de Carlos Espinosa.

³ Asistentes, según el registro del acta: Sr. Juan Gómez Millas, rector Universidad de Chile; Sr. Carlos Mori, decano de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, U. de Chile; Sr. Edmundo Thomas, director de IDIEM, Universidad de Chile; Sr. Luciano Cruz-Coke, jefe Centro Universitario Zona Norte, U. de Chile; Sr. Germán Frick, investigador IDIEM; Sr. Angelo Filipponi, profesor

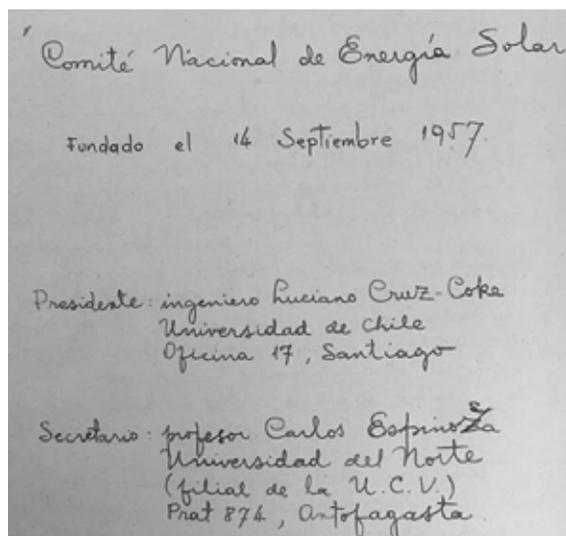
En esta primera reunión del Comité Solar se presentaron los trabajos de un especialista local y de un invitado internacional. Germán Frick, ingeniero del Instituto de Investigaciones y Ensayos de Materiales (IDIEM, Universidad de Chile), analizó el potencial de la radiación solar como fuente de energía para Chile. Por su parte, Enri Dormont, profesor francés invitado por la Universidad de Chile a una estadía académica, presentó los resultados de sus investigaciones en fotoelectricidad y en medición de la radiación solar en el norte chileno. Además de las presentaciones y discusiones técnicas, se habló de la organización de una comunidad de especialistas locales y se consideró la creación de una asociación nacional, la publicación de un boletín periódico y la organización de un encuentro técnico-científico⁴. En esta primera sesión se acordó invitar a delegados para integrar el Comité, además de las universidades asistentes —Universidad de Chile, UTFSM y Universidad Católica del Norte— a las universidades de Concepción, Técnica (UTE), Católica de Santiago, Católica de Valparaíso y Austral, así como al Instituto de Ingenieros, Instituto de Investigaciones y Ensayos Eléctricos, el Instituto de Ingenieros de Chile, el Servicio Meteorológico, la Corporación de Ventas de Salitre y a un observador de Unesco.

de la U. de Chile; Sr. Enri Dormont, investigador francés en fotodiodos; Sr. Manuel Corvalán, ingeniero y profesor de la UTFSM ; Sr. Carlos Espinosa, director Centro de Energía Solar, U. del Norte; Srta. Nitza Cracoa, delegada U. del Norte (Antofagasta). Sesión 14 de septiembre de 1957, p. 4, Libro de Actas Comité Nacional de Energía Solar, Santiago, 1957. Archivo Personal de Carlos Espinosa.

⁴ Sesión 14 de septiembre de 1957, pp. 1-4, Libro de Actas Comité Nacional de Energía Solar, Santiago, 1957. Archivo Personal de Carlos Espinosa.



::: Don Carlos Espinosa revisando el Libro de Actas del Comité Nacional de Energía Solar, Antofagasta, 2010 (Fotografía de Roberto Román)



::: Portada del Libro de Actas del Comité Nacional de Energía Solar, Archivo personal de Carlos Espinosa (Fotografía de Roberto Román)

A nivel internacional, la energía solar convocaba a diversos investigadores e ingenieros que comenzaban a organizarse en torno a un trabajo colaborativo. En 1954, solo tres años antes de la creación del comité chileno, en Arizona, Estados Unidos, se formó una asociación para la energía solar aplicada, que más tarde dio origen a la International Solar Energy Society, ISES⁵, la sociedad más importante en el área. Desde sus inicios, ISES acogió a investigadores, ingenieros, industriales y agentes de gobierno de todo el mundo y estableció encuentros bianuales que reúnen a sus socios, abierto también a nuevos participantes⁶. En 1957 publicó el primer volumen de su revista científica, que hoy se llama *Solar Energy* y que se ha convertido en una publicación de referencia⁷.

Antes de la década de 1950 y de estos esfuerzos organizativos, el trabajo de científicos e ingenieros del área solar era disperso y escaso. Se destacaban algunos investigadores pioneros, entre ellos Farrington Daniels, reconocido como una figura fundamental en la historia moderna de la energía solar y en la creación de las primeras asociaciones⁸, Farrington, Abbot, Trombe, Telkes y Heywood — todos ellos nombrados a lo largo de este libro— fueron miembros del comité asesor de la asociación internacional desde sus inicios⁹.

Naciones Unidas fomentó el desarrollo de la energía solar, apoyó la formación de una red de colaboración científica en el área y organizó encuentros científicos a partir de los que publicó trabajos. En este marco se encuentran el Simposio de Energía Solar y Eólica de Nueva Delhi¹⁰ y el Primer Congreso Mundial de Energías Renova-

⁵ Desde 1971, ISES es el nombre de la sociedad.

⁶ Karl W. Boer, ed., *The Fifty-Year History of the International Solar Energy Society* (Boulder: American Solar Energy Society, Inc., 2005).

⁷ John A. Duffie y Harry X. Tabor, «The International Solar Energy Society: the first 25 years, 1955 to 1980», en *The Fifty-Year History of the International Solar Energy Society*, editado por Karl W. Boer (Boulder: American Solar Energy Society, Inc., 2005), 1-64.

⁸ Boer, *The Fifty-Year History...*

⁹ Duffie y Tabor, «The International Solar...».

¹⁰ Unesco, *Wind and solar energy; proceedings of the New Delhi symposium. Énergie solaire et éolienne; actes du colloque de New Delhi. Energía solar y*

bles, desarrollado en Roma en 1961¹¹. Este congreso fue el primero en tratar el tema de las energías renovables a nivel mundial. ISES trabajó en colaboración con Naciones Unidas y se certificó como sociedad en 1963, integrando las discusiones sobre desarrollo sustentable.

En Chile, el Comité Nacional de Energía Solar se reunió periódicamente a discutir aspectos técnicos en torno a las publicaciones y tendencias en ciencia y tecnología solar en el mundo y sobre los trabajos que se hacían en el país¹². Este Comité permitió establecer relaciones de trabajo duraderas en el tiempo, que sentaron las bases para la colaboración entre las universidades, en particular la UTFSM, la Universidad de Chile y la Universidad Católica del Norte. La colaboración se vio reforzada por la circulación de ingenieros, entre los cuales vale la pena destacar la trayectoria del ingeniero Germán Frick, que comenzó su labor en el comité como funcionario de IDIEM. Al año siguiente se trasladó al Centro Universitario de la Zona Norte de la Universidad de Chile en Antofagasta, donde trabajó en estrecha colaboración con Carlos Espinosa. Más tarde, Frick se trasladó a la UTFSM (1964 a 1978), donde trabajó con Julio Hirschmann. Posteriormente ejerció en la Universidad Católica de Valparaíso y luego en la Universidad de Santiago, siempre en investigación y desarrollo de tecnología solar¹³.

En las actas del comité aparece una mención a las antiguas Salinas, descritas en el capítulo 2 de este libro, que puede interpretarse como expresión del interés y conocimiento de la historia solar del país por parte de esta comunidad. El comité recomienda la lectura¹⁴ del artículo de Maria Telkes, publicado en 1955, y decide escribir

eólica; actas del coloquio celebrado en Nueva Delhi (París: Unesco, 1956).

¹¹ United Nations, *Proceedings of the United Nations Conference on New Sources of Energy: Solar Energy, Wind Power and Geothermal Energy: Rome 21-31 August, 1961* (New York: United Nations, 1963-1964).

¹² Libro de Actas del Comité Nacional de Energía Solar, Santiago, 1957. Archivo Personal de Carlos Espinosa.

¹³ Currículo de German Frick. Archivo Personal de Gisela Frick Hassenberg (nieta de German Frick).

¹⁴ Sesión del 3 de junio de 1958. Libro de Actas Comité Nacional de Energía Solar, Santiago, 1958. Archivo Personal de Carlos Espinosa.

a la autora para pedirle la foto original de Las Salinas¹⁵. En su artículo sobre desalinización en Chile, Julio Hirschmann incluyó esta parte de la historia basado en los escritos de Telkes y elaboró una panorámica del estado de desarrollo de la energía solar en Chile. Hirschmann destaca el uso industrial en las pozas de evaporación de Coya Meridional y los avances en mediciones y desarrollo tecnológico en las universidades¹⁶.

El interés por desarrollar el conocimiento científico y la investigación en las facultades de ingeniería chilenas se fortaleció hacia los años cincuenta. La formación de posgrado en el extranjero de los profesores universitarios y la investigación académica en ingeniería en la Universidad de Chile se consolidó con el rectorado de Juan Gómez Millas. La energía solar ofrecía preguntas y problemas que estimulaban la investigación; era un área incipiente en el mundo. Por su parte, en Chile se asistía a la mayor especialización de las ingenierías. Esto se observa, por ejemplo, en la creación de nuevos departamentos en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Chile, entre los que se cuenta el Departamento de Ingeniería Mecánica en 1965. A su vez, la UTFSM, que contaba con el Departamento de Ingeniería Mecánica más antiguo del país (creado en 1938), iniciaba actividades científicas y de investigación en materia solar con el trabajo de Julio Hirschmann¹⁷. Los ingenieros solares chilenos de esta época —años cincuenta y sesenta— fueron pioneros en el país y se integraron a las emergentes redes de ingeniería solar internacionales, tanto en investigación como en desarrollo tecnológico. Su trabajo se centró en la formación de equipos de investigación y desarrollo, así como en la educación de las nuevas generaciones.

El Laboratorio Solar de la UTFSM, fundado en 1960, conformó el equipo de trabajo más grande y con mayor proyección en el país. Su

¹⁵ Sesión del 18 de noviembre 1958. Libro de Actas Comité Nacional de Energía Solar, Santiago, 1958. Archivo Personal de Carlos Espinosa.

¹⁶ Julio Hirschmann, «Évaporateurs et distillateurs solaires au Chili», *United Nations, New Sources of Energy. Proceedings of the Conference. Rome, 21-31 August 1961. Volume 6: Solar Energy* (New York: UN, 1964), 224-238.

¹⁷ Universidad Técnica Federico Santa María, Departamento de Ingeniería Mecánica, *80 años formando ingenieros mecánicos* (Valparaíso: UTFSM, 2018).

trabajo se desarrolló tanto en el área de la medición de la radiación solar y la creación del Archivo Nacional Solarimétrico (ver capítulo 3) como en el desarrollo de aplicaciones tecnológicas (ver capítulo 4). El profesor Julio Hirschmann inició este laboratorio junto a los ingenieros Germán Frick y Johan von Sommerfeld¹⁸.

En la Universidad Católica del Norte también se creó un grupo de trabajo en energía solar, liderado por el profesor Carlos Espinosa. Allí se formaron investigadores entre los que destacó Orlayer Alcayaga, que hizo su doctorado en energía solar en Francia en la década de 1960. Este equipo trabajó con las camanchacas (densas nieblas de la madrugada en Atacama) y la destilación solar, realizó mediciones solarimétricas y experimentó en diversas aplicaciones de esta energía. En los años cincuenta trabajaron en el desarrollo de celdas fotovoltaicas y su adaptación a las particulares condiciones de radiación del norte chileno. Este trabajo se realizó en colaboración con misiones de investigación internacionales, instancias en las que se valoraba el potencial del desierto de Atacama.

En la Universidad de Chile, el trabajo en torno a la energía solar logró convocar a investigadores de distintos departamentos en la Facultad de Ingeniería (geotermia, geofísica y mecánica). Desde su fundación, el Departamento de Ingeniería Mecánica trabajó en estrecha colaboración con investigadores franceses, que impulsaron la investigación en energía solar. El Dr. Jacques Fournier, director del área termofluidos, consiguió la concurrencia de la Dirección General de Aguas y del Ministerio de Obras Públicas para los programas de investigación en desalinización¹⁹. Fournier trabajaba con el profesor Sergio Alvarado y colegas del Departamento de Ingeniería Mecánica.

Más adelante se formaron grupos de investigación en otras universidades del país. A comienzos de los setenta, el profesor Aldo Moisan, del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Concepción, comenzó a experimentar con la aplicación de la ingeniería solar a la construcción de viviendas. Más tarde, la

¹⁸ UTFSM, *80 años formando...*

¹⁹ J. Fournier, J.L. Grange y S. Vergara, «Water desalination by natural freezing», *Desalination* 15 (1974): 167-175.

Universidad de Magallanes formó un equipo dedicado a la energía eólica que colaboró con la comunidad solar, uniendo fuerzas en la promoción de las energías renovables.

Los centros de investigación universitarios mantuvieron un diálogo y un intercambio permanente entre sí. El Comité Nacional de Energía Solar dio lugar a una organización más amplia, creada en sintonía con las distintas organizaciones internacionales que se agrupaban en torno a ISES (International Solar Energy Society²⁰). Julio Hirschmann fue el director de la Asociación Chilena de Energía Solar Aplicada (ACHESA) desde su creación en 1963 hasta 1974²¹. Sin embargo, ACHESA se mantuvo como una organización de hecho hasta el inicio de los años noventa (tuvo comités regionales en Santiago, Arica, Antofagasta, La Serena, Valparaíso y Concepción). ISES se inició como una organización estadounidense que pronto fue sumando secciones internacionales. Aunque no hay un capítulo dedicado a la sección chilena en la conmemoración de los 50 años de ISES²², Duffie y Tabor mencionan que la sección chilena, presidida por Julio Hirschmann, fue la segunda agrupación internacional, después de la sección conjunta de Australia y Nueva Zelanda²³. Las secciones internacionales se desarrollaron en un modelo en que sus actividades eran independientes, pero con fuertes lazos entre ellas.

En las décadas de 1950 y 1960, el agua era el problema que movilizaba el trabajo con energía solar, tanto a nivel internacional como en Chile. La provisión de agua dulce y limpia era una necesidad especialmente crítica en el norte del país, y los grupos de investigación de las universidades se organizaron para trabajar al respecto. Se dio una coordinación natural en la cual cada equipo universitario se especializó en la investigación y desarrollo de un enfoque tecnológico para la solución del problema. Carlos Espinosa, en la Universidad Católica del Norte, en Antofagasta, desarrolló los atrapanieblas, aprovechando la camanchaca característica de la

²⁰ Boer, *The Fifty-Year History...*

²¹ Boletín No. 1 de ACHESA, 1978. Archivo Personal de Roberto Román.

²² Boer, *The Fifty-Year History...*

²³ Duffie y Tabor, «The International Solar...»: 27.

región. El Laboratorio Solar de la UTFSM, dirigido por Julio Hirschmann, se especializó en la desalinización por evaporación, lo que de alguna manera continuaba el trabajo de Charles Wilson, a quien Hirschmann admiraba.

Por último, el equipo de la Universidad de Chile desarrolló investigación en una tecnología de purificación por medio de la congelación del agua salobre con radiación terrestre (enfriamiento nocturno), método conocido como desalinización por congelación natural. Este fue un trabajo interdisciplinario de varios departamentos de la Facultad de Ingeniería. Jacques Fournier dirigió uno de los grupos participantes en la investigación, basando su trabajo en los avances realizados previamente por su colega de departamento Sergio Alvarado y las publicaciones del experto francés Felix Trombe. Roberto Román inicio su carrera en el área como alumno de pregrado, interesado en temas de energías renovables y contratado como ayudante de investigación de Fournier. El proyecto logró instalar una planta piloto de desalinización en Calama y abastecer el riego para un invernadero de hortalizas²⁴. El interés y la colaboración que generaban estos proyectos convocaba a diversas organizaciones, a menudo debido al entusiasmo de algún profesional que podía facilitar apoyo. Por ejemplo, los traslados a la planta piloto de Calama se hacían en camionetas del Ministerio de Obras Públicas y había también alguna relación con Corfo.

Más tarde, la motivación de la obtención de agua dulce se combinó con el interés por los hornos solares y otras aplicaciones. El reconocido investigador solar francés, Felix Trombe, empezó su trabajo en hornos solares a mediados de la década de 1940²⁵. Según relató Carlos Espinosa en una de las entrevistas con Roberto Román, Trombe quiso visitar la zona hacia el interior de Antofagasta, en la que se había interesado a partir de los escritos de Abbot. Trombe y Espinosa visitaron Montezuma y Chiu-Chiu. Montezuma —el lugar de máxima radiación solar, como se explica en el capítulo 3—, no fue adecuado para los hornos de Trombe, probablemente por las

²⁴ Fournier et al., «Water desalination...»: 167-175.

²⁵ United Nations, *Proceedings of the United Nations...*

dificultades de acceso. En cambio, Chiu-Chiu resultó un lugar ideal tanto en términos de radiación como de conectividad. Allí se hicieron entonces las mediciones periliométricas de radiación directa.

A partir de la experiencia de Trombe, la Corporación de Fomento de la Producción (Corfo) evaluó que la exploración de un proyecto de hornos solares en Chiu-Chiu tenía potencial y contrató un estudio de factibilidad con la consultora suiza Battelle. Estos «hornos» no tenían relación con la gestión doméstica, sino que se trataba de una suerte de concentradores que podían generar grandes volúmenes de energía a partir del Sol. Aun cuando el estudio se completó, el golpe de Estado de septiembre de 1973 dejó suspendido el contrato con la consultora, debido a que Corfo era una organización estatal. El golpe significó una fractura en toda la orgánica del Estado chileno, que se había construido, al menos, desde la instalación de la República Presidencial en 1925. La recién instalada dictadura no evidenció interés por continuar desarrollando la energía solar y aunque las relaciones entre los gobiernos en esta materia se aletargaron, la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Chile continuó la colaboración con investigadores franceses.

Sumado a lo anterior, en esta época se produjo una discontinuidad en los registros solares. Esto se constata en el registro mundial de radiación solar (World Radiation Data Center²⁶), donde existe un vacío en la información proveniente de Chile entre septiembre de 1973 y 1976. Además, la dictadura estaba en contra de la formación de asociaciones de cualquier tipo, lo que impidió que ACHESA formalizara su organización. Tuvieron que pasar algunos años para retomar las actividades de difusión y encuentro de la comunidad solar chilena.

²⁶ <http://wrdc.mgo.rssi.ru/>

3. ACHESA, LOS SENESE Y EL DESARROLLO SOLAR BAJO LAS LEYES DEL MERCADO

El año 1973 marcó un antes y un después para la historia de Chile en los más diversos ámbitos, y también marcó el desarrollo de la energía solar en el mundo. El golpe de Estado transformó al país y, como parte de un fenómeno regional de dictaduras en América Latina, las concepciones en torno al rol del Estado en el desarrollo económico cambiaron drásticamente. En el contexto internacional, la guerra de Yom Kippur en octubre de ese mismo año, marcó el alza de precios de los combustibles fósiles. De manera visionaria, unos meses antes, en julio de 1973, la Unesco había organizado un congreso en París que se tituló «El Sol al servicio de la humanidad»²⁷. En esa instancia se impulsó la discusión sobre la composición de la matriz energética a nivel internacional, dependiente de los combustibles fósiles, y se presentó a las energías renovables como alternativa²⁸. Chile tenía —aún tiene— una alta dependencia de las importaciones para abastecerse de energía y, por lo tanto, el alza del precio del petróleo era un problema económico importante.

La evolución de los precios del petróleo muestra una baja importante al iniciarse el siglo xx, los precios se mantienen entre el inicio de la década de los treinta e inicios de los setenta, para subir de manera dramática, presentando un nuevo período de bajos precios en los noventas y una nueva subida al inicio del siglo xxi²⁹.

El impacto del conflicto de Medio Oriente en los precios del petróleo convergió con la instalación dictatorial, que rápidamente asumió la lógica de mercado como parte estructural de su funcionamiento. De allí que sea posible vincular este posicionamiento económico con el incipiente desarrollo industrial de la energía solar durante la década de 1970 y 1980. La política económica de la dictadura chilena, basada en el libre mercado, implicó que el

²⁷ Unesco, *El correo. La energía del mundo lo que el Sol nos promete* XXVII, enero 1974.

²⁸ Unesco, *El correo. La energía...*

²⁹ James D. Hamilton, «Historical Oil Shocks», *NBER Working Paper* 16790, February 2011.

interés en la energía solar se basara en su rentabilidad económica en términos del análisis de costos y beneficios privados. En otras palabras, las tecnologías solares eran interesantes si presentaban una ventaja frente a otras alternativas desde el punto de vista de la rentabilidad económica. Paradójicamente, y en relación con la variación de los precios del petróleo, la energía solar tuvo un período de florecimiento, a pesar del desinterés y ausencia de políticas de fomento por parte del gobierno.

En junio de 1974, el presidente de ACHESA, Germán Frick, hizo un llamado para integrar nuevos socios y fortalecer la asociación, aun considerando que no era una organización formal. En su carta de invitación, establece: «estamos viviendo una maravillosa época... nos referimos a los rayos de sol, tantos años despreciados como fuente de energía... Ahora todo cambió. La Conferencia «El Sol al Beneficio del Hombre [sic], celebrada hace un año en París, abrió los ojos a todo el mundo; y también a los productores de petróleo...». Más adelante, asevera: «Quienes también han sido favorecidos con el alza del precio de los combustibles, son los que se dedican a desarrollar aplicaciones de energía solar, entre los cuales también nos encontramos nosotros. Hay un enorme interés en el país en instalar calentadores solares de agua y en desarrollar otras aplicaciones. Anteriormente: ¡Cuántos proyectos o diseños desechados porque no resultaron rentables! Ahora todo ha cambiado... Hay muchísimo que hacer...! y pronto!...»³⁰.

La Unesco continuaba su labor de apoyo en el desarrollo de la energía solar y, en 1974, junto con la Organización Mundial de Astronomía (IAU, por sus iniciales en inglés), realizó un curso en San Miguel, Argentina, al que asistieron ingenieros y académicos de toda América Latina y que dio pie a la formación de la Asociación Argentina de Energía Solar (ASADES)³¹. El curso permitió

³⁰ Circular No. 1 de la Asociación Chilena de Energía Solar Aplicada, 20 de junio de 1974, firmada por German Frick, presidente de ACHESA. Archivo Personal de Roberto Román.

³¹ Graciela Lesino, «Argentina Solar Energy Society 1974-1980, en *The Fifty-Year History of the International Solar Energy Society*, editado por Karl W. Boer (Boulder: American Solar Energy Society, Inc., 2005), 65-72.

establecer lazos entre los ingenieros solares de la región. Entre otros chilenos, asistieron Roberto Román, Wilfredo Jimenez, Olayader Alcayaga y Eloísa Terrazas. Allí establecieron lazos no solo con colegas argentinos, sino también con los peruanos Ricardo Zuleta y Roberto Acevedo, así como con la organización española CYTED. Posiblemente, allí se estableció algún contacto para la visita a Chile de una comisión de Unesco en 1976, en la que se recorrieron las instalaciones solares nacionales³².

En 1978, bajo la dirección de German Frick, ACHESA editó su primer boletín y organizó el Primer Seminario de Energía Solar y Eólica, SENESE³³. La directiva decidió dar prioridad a la formalización de ACHESA como sociedad científica y continuó el trabajo en la creación de estatutos, iniciado en 1974 durante la presidencia de Julio Hirschmann y que continuó en el período de Gastón de Goyeneche (1976-1978). El 3 de julio de 1980 lograron un documento que fue certificado notarialmente e ingresado para la inscripción de la autoridad gubernamental competente³⁴. La dictadura no fomentaba la creación de sociedades o agrupaciones comunitarias y los estatutos nunca lograron oficializarse. La ausencia de personalidad jurídica fue un tema recurrente en las actas del directorio de ACHESA, porque impedía a la asociación representarse a sí misma y al país ante los organismos internacionales. No obstante, la Oficina de Planificación Nacional, Odeplan, auspició la realización del primer SENESE, que se realizó en el campus Lo Contador de la Pontificia Universidad Católica entre el 31 de julio y el 4 de agosto de 1978. La arquitecta Ximena Ibáñez lideró la organización del evento. Ibáñez se había especializado en helioarquitectura en Francia en 1977, donde coincidió con Roberto Román y Olayader Alcayaga.

³² ACHESA, Boletín 1, No. 1, agosto 1978. Archivo Personal de Roberto Román.

³³ ACHESA, Boletín 1, No. 1, agosto 1978. Archivo Personal de Roberto Román.

³⁴ Estatuto de ACHESA, 3 de julio de 1980, Archivo Personal de Roberto Román.

En el resumen y conclusiones de ese primer seminario se da cuenta del optimismo y entusiasmo que concitó la energía solar en el país, en contraste con años anteriores. Al mismo tiempo, se insistió en la necesidad de estrechar la colaboración entre los distintos grupos de trabajo. La comunidad solar se comprometió a mantener y compartir actividades de divulgación, investigación, docencia y desarrollo y a concitar el apoyo del Estado, por ejemplo, en la realización de proyectos piloto en edificios públicos (escuelas, hospitales y viviendas sociales, entre otros) y en la creación de normas regulatorias³⁵.

Los SENESE se convirtieron en el lugar de encuentro de la comunidad académica en las distintas sedes de las universidades participantes. ACHESA contaba con más de cien miembros que participaban en los SENESE junto con otros profesionales y académicos solares. En aquellos años, era una comunidad mayoritariamente masculina: en la lista de socios de los años 1978 a 1980 solo aparece una mujer, la arquitecta Graciana Parodi de la Universidad de Chile. Luego, en un catastro de investigadores vinculados a la energía solar realizado por ACHESA en 1980, que lista a 164 investigadores, además de Graciana Parodi y Ximena Ibañez (de Arquitectura de la Universidad Católica), se registra a María Elena Cuzmar de la Universidad del Norte, Marcela Jiliberto y Eleonor Carmendia de Tecnología de Alimentos de la Universidad de La Serena, Myriam Pérez de Endesa y Viviana Arce de la consultora CADE-IDEPE³⁶.

El registro muestra la vinculación con energía solar de varias universidades a lo largo del país, así como de empresas e instituciones del Estado y del sector privado. Además, se elaboró un registro de 50 técnicos nacionales en energía solar, nombrados como «heliotécnicos». Los académicos trabajaban en temas diversos, por ejemplo, en 1979, Roberto Román reportó un secador solar de tipo mixto para frutas y hortalizas en la Región de Coquimbo, un motor solar térmico experimental, la obtención de vapor de proceso y el

³⁵ ACHESA, Boletín 1, No. 1, agosto 1978. Archivo Personal de Roberto Román.

³⁶ Lista de investigadores e instituciones nacionales vinculadas con el estudio de la energía solar y sus aplicaciones y lista de heliotécnicos nacionales, ambos sin fecha, Archivo Personal de Roberto Román.

diseño del proyecto de calefacción para el Hospital de Potrerillos de Codelco, además de estudios teóricos y construcción de medición solarímetrica de bajo costo³⁷.



::: Participantes en seminario SENESE
(Archivo personal de Roberto Román)



::: Roberto Román y Pedro Roth en el Séptimo SENESE
(Archivo personal de Roberto Román)

³⁷ Carta de Roberto Román a German Frick, 12 de marzo de 1979, Archivo Personal de Roberto Román.



::: Pedro Serrano con dos afiches SENESE, ilustrados por él
(Fotografía de Pedro Serrano, junio de 2019)

MEMORIAS DE ACHESA

Pedro Serrano

«El sueño de las renovables»

Me recuerdo en los años setenta y ochenta, cuando militábamos en las filas de la energía solar y eólica en una asociación que se llamaba ACHESA, la Asociación Chilena de Energía Solar Aplicada. Proponíamos académicamente, en nuestros congresos anuales, que el futuro sustentable para la patria era volcarse a los energéticos renovables como la energía solar y la energía eólica. Luego tomaron también cuerpo la biomasa, el biogas, las energías oceánicas, la geotermia, incluso la tracción humana y animal.

Por supuesto, éramos tratados de locos peligrosos; con suerte, de soñadores. Chile era un país que funcionaba a petróleo im-

portado, carbón mineral, leña brutal y un esfuerzo hidroeléctrico liderado por el Estado y nuestra empresa Endesa, empresa de todos los chilenos...

Lo bueno y esperanzador de esta historia es que por fin nuestro antiguo discurso de la ACHESA (QEPD) está tomando realidades palpables y ha iniciado un ya atrasado camino —30 años de atraso— para desarrollar nuestros potenciales energéticos locales y sustentables y dejar de ser un país energéticamente dependiente, lo que es vergonzoso, teniendo, desde hace milenios, los recursos disponibles.

(Fragmento, publicado en <https://noticias.usm.cl/2015/03/04/el-sueno-de-las-ernc-2/>)

Mientras estas iniciativas se llevaban a cabo, en la década del 1970 y 1980, el Estado se retiró como colaborador y financista en los proyectos de investigación y desarrollo, como el horno de Trombe en Chiu-Chiu y la desalinización por congelación que llevaba a cabo la Universidad de Chile; asimismo, la Corfo dejó de invertir en innovaciones tecnológicas y desarrollo de nuevas industrias relativas a la energía solar. Tal como se mencionó anteriormente, a pesar de la ausencia de políticas públicas de fomento a la energía solar, el alto precio del petróleo cambió la relación costo-beneficio de las tecnologías solares, que comenzaron a ser rentables. En este contexto es posible explicar el período de crecimiento de la energía solar en Chile, desde fines de 1973 hasta fines de la década de 1990. Para una dictadura recién impuesta y que buscaba legitimarse e institucionalizarse, asumir una crisis económica producto de la debacle energética mundial no era una alternativa.

En este período de crecimiento, los grupos de investigación y desarrollo de aplicaciones tecnológicas se consolidaron y aumentaron; hubo un incipiente crecimiento de la industria, con nuevas empresas que lograron sustentarse y permanecer en el mercado. Así, por ejemplo, se desarrolló una división solar en la empresa de manufacturas de cobre, MADECO SOLAR, que construyó acumuladores de cobre,

estanques para guardar agua caliente duraderos y antibacterianos. También se instalaron representantes de empresas internacionales, como MIRO Solar (representante de la marca de colectores planos israelí, MIROMIT), que todavía existe en Chile, pero con nuevos dueños. Otros emprendimientos fueron pequeños y no perduraron más allá de los años ochenta. En el área fotovoltaica también participaron privados, como Heliplast, una de las primeras empresas en el área. Roberto Román dictó cursos para la Empresa Nacional de Telecomunicaciones, Entel, como parte de su proceso para evaluar alternativas de suministro energético para su red troncal en el norte. Entel instaló repetidoras fotovoltaicas que resultaban más convenientes que usar gas.

El agua nuevamente estaba al centro de los proyectos solares, pero esta vez el énfasis se puso en el calentamiento de agua sanitaria e industrial, dada la favorable tasa de retorno de estos proyectos. Bajo los criterios de mercado la industria solar nacional logró algún grado de desarrollo, en el que el Estado tuvo participación activa en la generación de demanda de proyectos para reducir costos de operación de las instalaciones públicas y en la optimización de la gestión de la minera estatal Codelco. Ejemplos de proyectos de mayor envergadura que la de uso doméstico o residencial son la provisión de agua caliente solar para el Hospital de Combarbalá y para la Cárcel de Colina. La instalación del Hospital de Combarbalá la hizo el empresario Martin Meuli, representante de colectores suizos. En la licitación de la construcción de la Cárcel de Colina, las bases exigían la incorporación de agua sanitaria solar.

La minería también incursionó en las aplicaciones solares, tanto en provisión de agua caliente para las instalaciones de uso de los trabajadores como en aplicaciones en el proceso industrial. En octubre de 1980, Codelco organizó una reunión interdivisional (Chuquicamata, El Teniente, El Salvador y Andina) sobre energía solar. Los conferencistas invitados fueron Orlayer Alcayaga de la Universidad del Norte, que expuso sobre concentración de energía solar; Adolfo Arata de la UTFSM, que habló sobre comportamiento económico de los sistemas calentadores de agua por energía solar;

y Roberto Román de la Universidad de Chile, que presentó sobre arquitectura solar. Además, se expusieron trabajos de investigación y desarrollo al interior de Codelco sobre concentración solar, los sistemas solares de las divisiones de Chuquicamata y El Salvador y el secado solar de concentrado en esta última división. También presentaron los proveedores de equipos solares, que exhibieron sus equipos, y se realizó una visita a la cancha solar en la mina El Salvador³⁸.



∴ Participantes de la reunión interdivisional de CODELCO, 1980
(Archivo personal de Roberto Román)

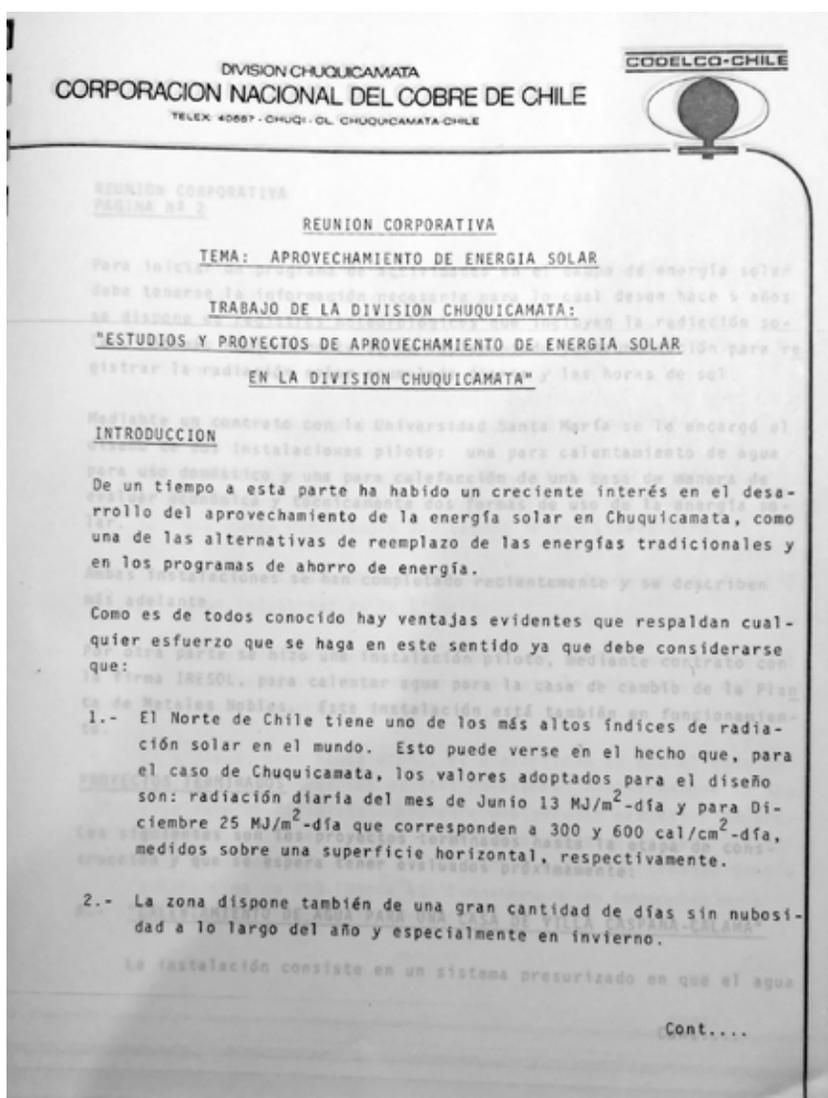
Ese mismo mes, en octubre de 1980, se realizó una reunión corporativa en Chuquicamata³⁹ sobre el aprovechamiento de la energía solar en la división. Allí se aclaró que el interés en energía solar había aumentado, debido a la posibilidad de remplazar a las energías

³⁸ Programa de Actividades Reunión Interdivisional sobre Energía Solar 1980, División Salvador, Superintendencia Ingeniería Civil, Codelco, Archivo Personal Roberto Román.

³⁹ Reunión corporativa. Tema: aprovechamiento de la energía solar. Estudios y proyectos de aprovechamiento de la energía solar en la división Chuquicamata, Codelco, Archivo Personal Roberto Román.

tradicionales y ahorrar energía, un costo importante en la minería. Ya contaban con cinco años de registros solares y la importancia de los datos era evidente; se habían hecho de instrumentos para registrar la radiación solar acumulada diaria y las horas de sol. Comenzaron con dos proyectos piloto con la UTFSM: el calentamiento de agua para una casa de Villa Caspana en Calama y la calefacción solar para una casa de Villa Atacama en Chuquicamata. A estos se añadió un tercer proyecto piloto con la empresa IRESOL para calentar agua en la casa de cambio de turnos de la planta de metales nobles. Los tres proyectos estaban terminados y en la reunión se dio una cuenta detallada de la evaluación técnica y económica de estas dos formas de uso. Como se trataba de proyectos piloto, se había medido y registrado sistemáticamente el proceso y el rendimiento, se había hecho un análisis de los problemas detectados y se presentaron las medidas que se estaban tomando para incorporar este aprendizaje en futuros proyectos. Para entonces, la división ya tenía otros tres nuevos proyectos en desarrollo: el calentamiento de agua para el gimnasio y la calefacción para el parvulario de Chuquicamata, y el calentamiento de agua para una casa en la población Bellavista. De estos proyectos en desarrollo también se dio cuenta durante la reunión⁴⁰.

⁴⁰ Reunión corporativa. Tema: aprovechamiento de la energía solar. Estudios y proyectos de aprovechamiento de la energía solar en la división Chuquicamata, Codelco, Archivo Personal de Roberto Román.



::: Documento Reunión Corporativa, División Chuquicamata, CODELCO, 1980 (Archivo personal de Roberto Román)

Por otra parte, en la División El Salvador de Codelco se construyó la casa de cambio de turnos de la mina con agua caliente solar (se bañaban allí, diariamente, 400 operarios) y un sistema de climatización con un muro Trombe, que es un sistema de calefacción solar pasivo apto para viviendas, desarrollado originalmente

por Felix Trombe, que consiste en una intervención arquitectónica en que se instala en un muro que permite aprovechar la radiación solar. Este proyecto fue diseñado por Roberto Román y Silvio Seis, mientras que la ejecución y arquitectura la hizo la división El Salvador de Codelco, entre 1979 y 1981. Adolfo Arata y un equipo de la UTFSM trabajaron en los proyectos de agua caliente de la casa de cambio. Bajo esta misma iniciativa, y en una lógica más industrial, se construyó también una planta secadora del concentrado de cobre, que la hizo la empresa de ingeniería CADE-IDEPE. La planta operó, al menos, ocho o 10 años, aunque seguía funcionando cuando se discontinuó su uso debido a que se perdía concentrado al cargarlo en seco por los vientos de la zona; hasta entonces había sido la mejor solución disponible y se reemplazó por un sistema de prensa.

Más allá de las iniciativas propiamente mineras, hubo otros proyectos destacables por su envergadura, como la provisión de agua caliente para el Hotel de Turismo de Copiapó en los ochenta y el edificio de la naciente Fundación Chile en 1976. Este último se diseñó con un sistema de calefacción solar, que no funcionó, y otro de aire acondicionado que se mantuvo por algún tiempo. Los proyectos se justificaban por el ahorro en combustible, ya que en ese entonces no se pensaba en valorar o promocionar las ventajas ambientales.

Como sucede con las primeras aplicaciones de las tecnologías emergentes, todos estos proyectos fueron una oportunidad para el aprendizaje y el desarrollo de capacidades locales, derivados tanto de los aciertos como de los problemas con la implementación. Se aprendió, por ejemplo, que se debían usar vidrios más gruesos y que la dureza del agua en Chile presentaba un desafío importante. El caso de la Cárcel de Colina quedó en la memoria de la comunidad solar cuando, a la primera revuelta, los internos subieron al techo y destrozaron los colectores.

Otra aplicación que logró visibilidad y algún grado de desarrollo durante este período fueron las cocinas solares. Existía abundante literatura internacional sobre la tecnología de cocinas solares; de ella se concluía que los resultados eran desastrosos porque los usuarios no apropiaban la tecnología y los artefactos no llegaban

a integrarse a las prácticas domésticas. La tecnología funcionaba, pero los usuarios parecían reticentes a adoptarlas, en una medida que justificara los proyectos desde la perspectiva de una evaluación económica. No obstante, los desarrollos de cocinas solares continuaban en distintas partes del mundo. A fines de los ochenta se realizó un concurso internacional organizado por el PNUD, que se falló en la ciudad de La Serena. Los ganadores, Pedro Serrano de la UTFSM y Gabriel Rodríguez de la Universidad de Chile, desarrollaron sus proyectos en la comunidad de Villaseca, una zona de pobreza económica extrema en el Valle del Elqui⁴¹.

A partir de estos diseños se armó un equipo de desarrollo para el proyecto de implementación de las cocinas solares. María Teresa Guzmán y Gloria Yuri, del Instituto de Nutrición y Tecnología de los Alimentos de la Universidad de Chile (INTA), identificaron una comunidad con la necesidad de acceder a combustible para cocinar y condiciones de pobreza tales en las que el precio del gas les resultaba prohibitivo. Este punto de partida para el proyecto cambiaba el enfoque que hasta entonces habían tenido la mayoría de los proyectos de desarrollo de cocinas solares en el mundo. El diseño de cocinas solares tenía un objetivo de desarrollo tecnológico y, en este caso, la tecnología estaba al servicio de un objetivo social: proveer acceso a energía para cocinar alimentos a familias que no podían pagar por combustible. Las cocinas solares de Villaseca fueron innovadoras no solo en los aspectos tecnológicos, también en la gestión del proyecto de innovación. En su éxito fue determinante el trabajo con la comunidad de usuarias de las cocinas.

Canal 13 de televisión realizó un documental⁴² que dio visibilidad al caso y Pedro Serrano abordó la relación entre género y energía en su posgrado en la Universidad de Valencia⁴³. La relación

⁴¹ Pedro Serrano, *Los aliados del Sol. Cuentos de gente innovadora, eficiencia energética y medio ambiente* (Santiago: Unicef y Casa de la Paz, 1994).

⁴² Parte 1 de 3: <https://www.youtube.com/watch?v=nEmh5lGv9Ms>. Parte 2 de 3: <https://www.youtube.com/watch?v=Uxv3r8uqltE>. Parte 3 de 3: <https://www.youtube.com/watch?v=n5E495iltKM>

⁴³ Entrevista de Cecilia Ibarra a Pedro Serrano, realizada en junio de 2019.

de las mujeres de Villaseca con las cocinas solares muestra una rica y compleja historia. Primero, ellas lograron aprender a manejar estas cocinas. De hecho, en el documental una de ellas dice: «lo hice, logré algo después que no era nadie». Además, pudieron independizarse de la leña, un combustible escaso y difícil de recopilar, en especial en la región semiárida de Coquimbo. Luego, las mujeres comenzaron a aprovechar su dominio tecnológico para generar ingresos, primero para preparar y vender queques y, más adelante, con la instalación del «primer restorán solar del mundo», a 70 km de La Serena, en el medio de los cerros. Este proyecto les tomó años de trabajo y esfuerzo y tuvieron que superar múltiples dificultades, como obtener permisos sanitarios. Lograron hacerlo funcionar entre 2001 y 2006. Una diferencia entre las socias llevó al fin del proyecto, para dar paso a un nuevo emprendimiento familiar similar, que sigue en marcha.

El caso de las cocinas de Villaseca es una muestra de toda un área de desarrollo paralelo de la energía: las tecnologías socialmente apropiadas (TSA). Estas son tecnologías que los mismos usuarios pueden construir, reproducir y reparar. Los ingenieros solares dedicados a esta área fueron prolíficos en el desarrollo de artefactos para el uso comunitario, tanto en Chile como en América Latina. Algunas de estas iniciativas fueron registradas en el libro *Artefactos solares simples*⁴⁴, distribuido por el Ministerio de Educación y la Fundación de Comunicaciones, Capacitación y Cultura del Agro (FUCOA) en las escuelas del país. Se desarrollaron múltiples trabajos y escuelas formativas financiadas por agencias internacionales como la Agencia de Cooperación Técnica Alemana (GTZ, por sus iniciales en alemán) y la cooperación holandesa, también se generaron publicaciones que dan cuenta de los desarrollos logrados, dentro de las que destaca el libro ilustrado *Energía solar para todos*⁴⁵. Muchos de los artefactos se podían construir con materiales de desecho y a muy bajo costo, como, por ejemplo, un colector para calentar agua

⁴⁴ Pedro Serrano, *Artefactos solares simples. Construcción con tecnología apropiada* (Santiago: CETAL, 1988).

⁴⁵ Pedro Serrano, *Energía solar para todos* (Santiago: ARTESOL, 1994).

en base a botellas de plástico pintadas de negro (que se presentó en SENESE Antofagasta).

Desde inicios de los años setenta hubo un panorama favorable para la energía solar. Las consecuencias de los altos precios del petróleo no solo afectaban la economía chilena, sino a distintos países del mundo. Esto explica que resurgiera la investigación y el desarrollo de tecnologías y aplicaciones de la energía solar, como puede comprobarse en el crecimiento de la asociación internacional ISES y en el número de artículos y la diversidad de temas de su revista *Solar Energy*. A los centros de investigación más importantes en el tema, como el laboratorio Odeillo en Francia, se sumaron el Solar Energy Research Institute, creado en 1974 en Estados Unidos, y se formaron nuevos grupos de investigación universitarios en distintas partes del mundo.

Francia lideraba la investigación. La crisis que generaron los altos precios del petróleo en 1973 activó la discusión sobre dependencia de los combustibles fósiles para generar energía. En este sentido, Francia ya tenía un antecedente en el conflicto internacional de Medio Oriente menos de dos décadas atrás, como había experimentado con el canal de Suez, por lo que su sensibilidad al respecto podía ser decisiva. Quizás eso haya incidido para explicar por qué Francia cambió su política energética y apostó por la energía nuclear como fuente de generación de energía eléctrica. Esta opción implicó que concentrara recursos en la investigación nuclear, quitando prioridad al desarrollo solar y perdiendo el liderazgo que tuvo en un principio. La importancia de encontrar fuentes energéticas alternativas eficientes y efectivas para producir electricidad impulsó investigaciones sobre la aplicación de la energía solar en otras partes del mundo.

A nivel internacional, los ochenta fueron años de debate e incertidumbre respecto de los caminos a seguir para el desarrollo energético. En las discusiones de la época se argumentaba la importancia de mejorar la eficiencia energética de los artefactos basados en combustibles fósiles y los beneficios de invertir en energía nuclear,

como había hecho Francia. Además, se escuchaba con mayor frecuencia la preocupación por el medio ambiente⁴⁶.

A fines de la década el panorama de decisiones de inversión estaba más claro. En la Conferencia ISES de 1987 realizada en Hamburgo⁴⁷, se evidenció el interés por la investigación y desarrollo en energías renovables en Europa, con aumentos en la inversión realizada por los gobiernos europeos. Estados Unidos, en cambio, dejaba de invertir en investigación y desarrollo, lo que hizo que su presencia comercial en el área solar no se sostuviera en el tiempo. Había tenido logros importantes en el desarrollo comercial de las aplicaciones tecnológicas en los ochenta, con instalaciones como la planta LUZ en California, de 104 MegaWats de electricidad, generada por un sistema térmico. Sin embargo, las políticas de este país se alejaban de los acuerdos internacionales para reducir emisiones de gases de efecto invernadero y de la abierta preocupación de participantes de ISES por la creciente militarización del petróleo en el Golfo Pérsico⁴⁸. Los miembros de ISES comenzaron a usar el cambio climático como un argumento de promoción de la energía solar y los cambios en la política internacional dieron lugar a múltiples debates respecto de cuál sería el rol de ISES en el nuevo escenario⁴⁹. ISES se hizo parte de las discusiones internacionales por el cambio climático desde la Cumbre de la Tierra, organizada por las Naciones Unidas en Río de Janeiro, Brasil, en junio de 1992, hasta las conferencias que siguieron en el marco del cambio climático. En la Conferencia de Río se aprobó la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático y la Agenda de Acción para el siglo XXI.

⁴⁶ David Mills, «The International Solar Energy Society – The Second 25 Years, 1980 to 2005», en *The Fifty-Year History of the International Solar Energy Society*, editado por Karl W. Boer (Boulder: American Solar Energy Society, Inc., 2005).

⁴⁷ David Mills, «The International Solar...».

⁴⁸ David Mills, «The International Solar...».

⁴⁹ David Mills, «The International Solar...».

4. LA EXTINCIÓN DE ACHESA Y LOS AÑOS DE SILENCIO SOLAR

El modesto florecimiento de la energía solar en Chile durante los años setenta y ochenta terminó al llegar la nueva década, con la percepción generalizada que la disminución de los precios del petróleo sería constante. La industria chilena en energía solar había emergido en una lógica de mercado pues los mayores precios relativos de los otros combustibles la hicieron competitiva. No hubo una política de fomento al desarrollo de la industria solar, ni programas o instrumentos que favorecieran al sector. En el hemisferio norte, en cambio, la industria solar se apoyaba en la inversión en investigación y desarrollo hecha por los gobiernos europeos⁵⁰. En Estados Unidos, el desarrollo de los ochenta había contado con algunos beneficios, como la rebaja de impuestos. El panorama mundial energético comenzó a cambiar con la invasión de Estados Unidos a Irak. La guerra del Golfo en 1991 y las crecientes preocupaciones por el medio ambiente y el cambio climático influyeron en la revisión de la política energética de los países, aunque los precios del petróleo permanecieran relativamente bajos durante la década de 1990.

En 1994, en el contexto chileno ocurrió un hito significativo: la Asociación Chilena de Energía Solar (ACHESA) realizó la que sería su última reunión, en Punta Arenas. No se disolvió formalmente; de hecho, no hay un acta de finalización de las reuniones. Simplemente, los encuentros no volvieron a organizarse. Este hecho parece un símbolo de lo que fueron los años noventa para la energía solar en Chile: un período de retroceso y abandono, sin que esto provocara una noticia o una preocupación por parte del Estado o de otro actor que pudiese haber tomado decisiones para reimpulsar el desarrollo solar.

El trabajo académico en las universidades continuó, a pesar de la disminución de la actividad industrial del sector. En el caso de Roberto Román, su continuidad fue posible gracias a la colaboración internacional a través del programa Quinto Centenario de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED) y la colaboración con España.

⁵⁰ David Mills, «The International Solar...».

Proyectos como este permitieron a los académicos chilenos establecer y mantener lazos con la comunidad solar latinoamericana y mundial. Un área que se abrió y que dio la posibilidad de continuar con el trabajo fue el creciente interés por la gestión ambiental. Los asuntos ambientales y la preocupación por el cambio climático eran temas recurrentes en los seminarios de energía solar en Chile y en el mundo. Los investigadores e ingenieros solares tenían una base para trabajar en este tema, al que se le destinaron algunos fondos públicos. CYTED financió proyectos en Chile entre 1987 y 2007, se realizaron proyectos interinstitucionales que involucraron a la Universidad de Chile, la UTFSM y organizaciones de España, Portugal y Perú, como, por ejemplo, el proyecto de secado solar⁵¹.

En el área de las tecnologías socialmente apropiadas, el escenario era algo distinto, a pesar de la disminución de los aportes de la cooperación internacional. El trabajo continuaba con proyectos para el desarrollo y apropiación de tecnologías de uso comunitario en Chile y otros países de América Latina. Nuevas publicaciones, como el libro de cuentos ilustrado *Los aliados del Sol: cuentos de gente innovadora, eficiencia energética y medio ambiente*⁵², financiado por la Casa de la Paz y la Unicef, seguían difundiendo las posibilidades del uso del sol a nivel de las comunidades locales.

5. EL APOYO DEL ESTADO PARA EL DESPERTAR DE LA ENERGÍA SOLAR EN CHILE

La mayor conciencia sobre los efectos del cambio climático y la necesidad de reducir emisiones influyó en que se produjera un vuelco definitivo respecto de la percepción de la importancia de las energías renovables. Esto último no era un asunto desconocido; más bien, era un tema recurrente en los seminarios internacionales de energía solar desde sus inicios⁵³. No obstante, no aparecía en las discusiones

⁵¹ Roberto Corvalán et al., eds., *Ingeniería de secado solar. Subprograma VI: nuevas fuentes y conservación de la energía* (CYTED, 1999).

⁵² Pedro Serrano, «Los aliados del Sol...».

⁵³ Boer, *The Fifty-Year History...*

nacionales e internacionales sobre desarrollo, política energética y control de emisiones, problemáticas que comenzaron a tener una visibilidad muchísimo mayor en Chile al comenzar el siglo XXI.

En este sentido, y si bien el gobierno de Ricardo Lagos (2000-2006) comenzó con algunas iniciativas relativas a la preocupación por el cambio climático, el primer gobierno de la presidenta Bachelet (2006-2010) fue el primero en prestar atención a la energía solar y desarrollar acciones concretas. Entre ellas, se encargó un estudio para informar el desarrollo de una política de fomento al uso de agua caliente con energía solar. Este estudio lo desarrolló la consultora francesa Transenergie, cuyos informes fueron la base para elaborar el programa de subsidio de colectores térmicos residenciales. El Estado reguló la tecnología de los colectores térmicos, y su uso, y dio el marco necesario para el desarrollo del mercado con la Ley de Subsidio de Colectores Solares Térmicos y su reglamento asociado.

El gobierno de la presidenta Bachelet formuló las bases de licitación de un proyecto para instalar una central de concentración para producir energía eléctrica, licitado por el gobierno del presidente Piñera. Ganó Cerro Dominador, presentado por Abengoa, una empresa constructora española. Cerro Dominador es una central termosolar para la generación de 100 Megawatt de potencia, capaz de generar electricidad día y noche por acumulación de energía en sales fundidas. Se instalaron, además, tres proyectos solares de gran tamaño, es decir, de varios Megawatt de potencia, para la producción de calor solar en las plantas de electroobtención de cobre. El primero entró en operación el 2010. Luego se desarrolló el proyecto de Minera El Tesoro (de Antofagasta Minerals), con un sistema de concentradores cilindro parabólicos de 10 Megawatt térmicos, y el proyecto Pampa Elvira Solar, con 38 mil m² de colectores en un estanque acumulador que abastece cerca del 80% de la demanda térmica de la planta de electroobtención de la Minera Gabriela Mistral. Electro-obtención es un proceso usado para producir cobre fino por fusión; por ejemplo, se usa en las fundidoras de El Teniente o en métodos de hidrometalurgia. En este método, grandes pilas de material se bañan con una solución de agua y ácido sulfúrico; la solución que entra se enriquece

de cobre y luego pasa a un proceso en el que el cobre se sigue concentrando por extracción por solvente, para finalmente pasar a las naves de electroobtención de depósito de cobre. El proceso necesita que la solución se caliente para electroobtención y el calentamiento se logra con energía solar, que reemplaza a las calderas a petróleo. De esta manera se logra la concentración del mineral sin pasar por la fase tradicional de pirometalurgia, sino que pasando directamente de la hidrometalurgia a electroobtención.

Un impulso importante para la energía solar, y para las energías renovables en general, fue la enmienda a la Ley Eléctrica de 2010, que obligó a las generadoras producir al menos un 10% de su energía con renovables⁵⁴. A esta ley siguió la creación del Ministerio de Energía en 2010 y el desarrollo de la Agenda Energía 2050, liderada por el ministro Pacheco⁵⁵.

En los años 2012 y 2013 se generó el gran proyecto fotovoltaico Amanecer Solar, de 100 Megawatt. Si bien existían proyectos fotovoltaicos, este fue el primero de gran tamaño e inició el auge de la tecnología fotovoltaica en Chile.

Otra de las políticas de importancia para la generación de energía eléctrica con energía solar fue la promulgación de la Ley de Generación Distribuida⁵⁶, Ley 20.571 promulgada en 2012. Generó polémica puesto que definió las condiciones en que generadores particulares (por ejemplo, una persona que tiene paneles solares en el techo de su casa) pueden inyectar energía eléctrica a la red. Finalmente, y después de extensas discusiones, se reguló la producción de electricidad con energías renovables no convencionales (ERNC) para el autoconsumo. Las condiciones que esta ley establece para que estos productores vendan su superávit a los distribuidores eléctricos, en la práctica, desincentivan la inyección a la red, debido al bajo precio

⁵⁴ Ley 20.257, Introduce modificaciones a la Ley General de Servicios Eléctricos respecto de la generación de energía eléctrica con fuentes de energías renovables no convencionales, 2008.

⁵⁵ Ministerio de Energía, Energía 2050, Política Energética de Chile. Ministerio de Energía, 2015.

⁵⁶ Ley 20.571, Regula el pago de las generadoras residenciales, 2012.

que pagan las empresas distribuidoras de electricidad. Resulta más conveniente consumir todo lo que se genera por energía solar. Sin incentivos, el desarrollo de la generación distribuida respondió a iniciativas particulares. Se han dado subsidios en casos muy puntuales, como los paneles fotovoltaicos que entregó el gobierno en 2017 para la reconstrucción y reubicación después del aluvión que sufriera la zona de Chañaral en 2015. La regulación de la generación distribuida ha tenido modificaciones, siendo reemplazada en 2018 por la Ley 21.118⁵⁷.

Por otra parte, los esfuerzos en investigación se reforzaron con financiamiento estatal para el área. Durante el primer gobierno del presidente Piñera (2010-2013) se destinaron fondos concursables que resultaron en la creación del Solar Energy Research Center (SERC), a través de un Fondap. Al inicio del período presidencial, Conicyt hizo un llamado para instalar un centro de investigación en energía solar por medio de un concurso con referato internacional, y ganó SERC Chile. El centro completó exitosamente sus primeros cinco años (2013-2017) y logró la continuidad para un segundo quinquenio (2018-2022), en base a la excelencia de su desempeño. El trabajo de SERC Chile convoca a investigadores de distintas instituciones del país y trabaja conectado a centros internacionales relacionados a sus líneas de investigación, que incluyen la energía solar en la industria y la minería, los sistemas eléctricos de potencia, los sistemas de coordinación para comunidades rurales y urbanas, el almacenamiento de la energía solar, el tratamiento solar de aguas y el desarrollo de aspectos regulatorios, económicos y sociales. La formación de estudiantes abarca desde el pregrado hasta el posdoctorado. SERC Chile ha sido prolífero en la publicación de sus trabajos para distintas audiencias⁵⁸. Este centro da cuenta de un esfuerzo acelerado por recuperar el tiempo de abandono en el desarrollo de la energía solar en Chile.

⁵⁷ Ley 21.118, Modifica la Ley General de Servicios Eléctricos con el fin de incentivar las generadoras residenciales, noviembre de 2018.

⁵⁸ SERC Chile, *Legado y desafíos de SERC Chile, 2013-2017*. <http://sercchile.cl/wp-content/uploads/2018/12/memoria-solar-2018-es.pdf>

A pesar de todas las fluctuaciones descritas a lo largo de la historia de la energía solar en Chile, la lógica del sector se ha caracterizado por la colaboración. En 2006 se formó la Asociación Chilena de Energía Solar, ACESOL, que es la primera asociación gremial que reúne a empresas y otros actores interesados en fomentar la energía solar en Chile. SERC Chile es un ejemplo de la mantención de la tradición colaborativa del sector. En noviembre de 2019 se realizará en Santiago el Congreso ISES, por primera vez en Latinoamérica.

6. CONCLUSIÓN: UNA VISIÓN PERSONAL

Para recapitular, es necesario plantear que el desarrollo de la ingeniería solar de Chile comenzó en la década de 1950, aun cuando haya existido una historia anterior, discontinuada, en torno a la industria salitrera en el siglo XIX. En los años cincuenta se desarrolló investigación en áreas tecnológicas de las universidades chilenas, mientras el desarrollo de capacidades en las ingenierías encontró un espacio de investigación en los temas solares.

El trabajo de investigación en energía solar se enfocaba hacia la medición y registro de la radiación solar y hacia una amplia gama de aplicaciones tecnológicas. Durante los años cincuenta y sesenta se formaron equipos de investigación universitarios, entre los que destacaron aquellos vinculados a la Universidad Técnica Federico Santa María, a la Universidad Católica del Norte y a la Universidad de Chile. Los grupos se organizaron de manera colaborativa, formaron una asociación nacional, ACHESA, y mantuvieron vínculos estrechos con la comunidad de científicos y técnicos internacionales. El emergente campo de investigación y desarrollo tecnológico de la energía solar en Chile, como tantos otros ámbitos de la vida, se vio truncado con el golpe de Estado en 1973.

En el año 1973 comenzó un nuevo período para la energía solar en el mundo, debido a los altos precios del petróleo. En Chile imperaban las leyes del mercado y las aplicaciones solares térmicas encontraron una posibilidad de crecimiento porque lograron mostrar rentabilidad económica. Se experimentó con diferentes tecnologías,

se obtuvieron resultados efectivos, se generó aprendizaje y hubo emprendimientos comerciales que lograron mantenerse. Desde fines de los setenta la comunidad se reorganizó en torno a un seminario bianual: SENESA. La nueva baja en los precios del petróleo en los noventa abrió un período de retroceso y abandono para la energía solar, que no repuntó hasta inicios del nuevo siglo, cuando la preocupación por los asuntos ambientales y el cambio climático despertó el interés por la energía solar. El apoyo al sector, con iniciativas como el subsidio a la calefacción de agua para uso residencial y el financiamiento de programas de investigación, fueron determinantes para el actual resurgimiento del área.

Esta visión del desarrollo de la energía solar en Chile ha intentado mostrar que «las cosas pasan por algo», es decir, que no se puede explicar el desarrollo de un área sin considerar lo que estaba pasando en el mundo y en el país. Los precios del petróleo, las políticas en torno al desarrollo de la matriz energética y la política y financiamiento de la investigación han sido determinantes en la evolución que ha tenido la energía solar. Por otra parte, hemos querido entregar antecedentes para concluir que, aquellos que están preparados, pueden aprovechar las oportunidades. Si bien la energía solar no había sido una prioridad en términos de las políticas públicas del país, cuando las condiciones de mercado fueron propicias —y bajo esas reglas— se logró un modesto surgimiento basado en las capacidades acumuladas en el período anterior. Aunque aquella no fuese una «gran» oportunidad, se pudo aprovechar porque había gente preparada. Desde otro punto de vista, quizás no se trabajó en todo el potencial que entregó aquel período en que se desarrolló la energía solar, en el sentido de darle más fuerza para acumular aún más capacidades y prepararse para la oportunidad mayor hoy existente. Los países que lideran el desarrollo de la energía solar en el mundo sí reaccionaron y trabajaron en aquel potencial previo, que hoy rinde frutos. Un grupo de científicos e ingenieros solares, a los que se han ido sumando nuevas generaciones, se mantuvo, quizás, por una cuota de porfía. El aprendizaje de todos estos años de experiencia de la ingeniería solar en Chile es que necesitamos seguir

aprendiendo, experimentando y trabajando de manera colaborativa, como ha sido nuestra tradición desde los inicios.

En nuestra visión, la comunidad solar se ha desarrollado desde el trabajo robusto y entusiasta de sus integrantes, que han trabajado formando redes y, a través de ellas, han influido para lograr un espacio para la energía solar, que, creen, es de beneficio para la humanidad y para el planeta. Gabriela Mistral nos asiste en profundizar en esta idea y nos esperanza con su conclusión optimista:

«El primer tiempo será pensar la profesión lo mismo que un pacto firmado con Dios o con la ciencia, y que obliga terriblemente a nuestra alma, y después de ella, a nuestra honra mundana. El segundo tiempo será organizar las corporaciones o gremios profesionales donde no existen, y donde ya se fundaron, depurarlos de corrupción y de pereza, vale decir, de relajamiento. El tercer tiempo será obligar a la sociedad en que se vive, a que vuelva a dar una consideración primogénita a las profesiones que desdeña y rebaja.

La tercera grada sube blandamente desde las otras dos: a la larga siempre se respeta lo respetable, y se acaba por amar lo que presta un buen servicio»⁵⁹.

⁵⁹ Gabriela Mistral, 1931. Extracto del discurso «El sentido de la profesión», pronunciado con motivo de la graduación de profesionales de la Universidad de Puerto Rico, en Roque Esteban Scarpa, *Grandeza de los oficios, prosas de Gabriela Mistral* (Santiago: Andrés Bello, 1979).

CAPÍTULO 7

DESAFÍOS Y OPORTUNIDADES PARA LA ENERGÍA SOLAR EN EL CHILE ACTUAL

Rodrigo Barraza^{}, Rodrigo Palma Behnke^{**},
Samir Kouro^{***} y Ana María Ruz^{****}*

I. RECURSO SOLAR PARA REDES Y CIUDADES INTELIGENTES EN CHILE

Al escribir sobre el sol, como recurso solar, es necesario recordar que las ciudades y los consumidores han evolucionado de la mano del desarrollo tecnológico. Un hogar dejó de ser un mero consumidor de energía eléctrica y, a través de la instalación de sistemas fotovoltaicos, se ha convertido en un pequeño generador de energía eléctrica. Si la masificación de sistemas de almacenamiento de electricidad (más precisamente, almacenamiento electroquímico a través de baterías) aumenta al igual que los sistemas fotovoltaicos, desde el punto de vista energético un hogar se convertiría en una unidad más compleja que consume, produce y tiene capacidad de almacenar energía. Esta unidad energética no solo se limita a los hogares, sino que aborda

^{*} Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Técnica Federico Santa María

^{**} Centro de Energía, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ciencia Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile; SERC Chile, FONDAP/CONICYT N° 15110019; Centro de Energía, Universidad de Chile

^{***} Departamento de Electrónica, Universidad Técnica Federico Santa María

^{****} Comité Solar e Innovación Energética CORFO

edificaciones mayores como comunidades, edificios residenciales y centros comerciales. Además, con la esperada masificación de la electromovilidad, los sistemas de carga de vehículos eléctricos serán más frecuentes en hogares y edificios, agregando complejidad al sistema.

Hoy es habitual escuchar sobre edificios, ciudades y redes inteligentes. Una unidad inteligente implica un sistema de control que permite optimizar la generación, el uso y el almacenamiento de energía. Para lograr un uso seguro, económico y eficiente de la energía en toda su cadena de valor —es decir, generación, distribución y uso final—, la implementación de sistemas y estrategias de control, que optimicen la administración de energía, es clave. Para ello, disponer de información sobre el uso y la disponibilidad futura de energía es fundamental. Para sistemas de producción de energía de origen fósil esa información es conocida, pero cuando la fuente de generación de energía es solar, la respuesta no es evidente. Entonces, la estimación del recurso solar en el corto plazo se vuelve relevante.

1. SISTEMAS INTELIGENTES

a) Sistemas de generación de electricidad solar

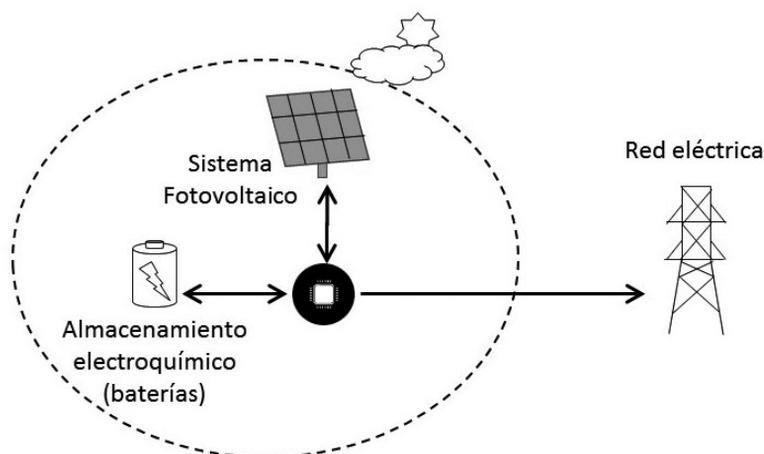
A gran escala, la generación de electricidad a partir de energía solar se realiza mayormente a través de plantas fotovoltaicas y, en menor medida, en sistemas de concentración solar de potencia térmica (CSP). Los sistemas fotovoltaicos realizan una conversión instantánea y directa de energía solar en electricidad por medio del efecto fotoeléctrico, a través de celdas fotovoltaicas que componen los paneles o módulos. La generación de electricidad en sistemas fotovoltaicos es proporcional a la radiación solar que reciben los mismos paneles, tanto de forma directa como difusa. Una variación en la radiación solar repercute, entonces, directa y rápidamente en la generación de electricidad de este tipo de plantas.

El análisis de la viabilidad técnica y económica para la instalación de una planta solar se realiza utilizando la disponibilidad del recurso solar medio de largo plazo, a través de un año meteorológico tipo (TMY, por su nombre en inglés). De ese modo se estima

la generación de electricidad durante el ciclo de vida de la planta solar. En cambio, para la operación de una planta solar se presenta el desafío de compatibilizar un recurso solar variable (variables de entrada) y un mercado eléctrico fluctuante, al menos, en precios, (variables de salida). En consecuencia, para la operación óptima de una planta fotovoltaica se requiere un modelo de control preciso, capaz de proyectar la generación de electricidad futura (en un horizonte de cuatro horas) en base a una predicción del recurso solar de corto plazo.

Lo anterior significa que tanto la generación de energía solar fotovoltaica y su despacho hacia las redes eléctricas son variables. Estas condiciones pueden ser compensadas mediante sistemas de almacenamiento de energía en baterías (o BESS, por sus iniciales en inglés). La figura 1 muestra la integración de sistemas de almacenamiento de energía a las plantas fotovoltaicas, que permite incrementar las prestaciones del sistema. En ese caso, el sistema fotovoltaico entrega energía eléctrica a la red eléctrica y/o al sistema de almacenamiento a medida que la produce. Además, un sistema de control optimizado permite flexibilidad para ofrecer bloques de potencia constantes, responder a la demanda u optimizar la energía aportada al sistema en base a una eficiencia económica. De ese modo, el sistema fotovoltaico puede ofrecer potencia al sistema eléctrico y servicios complementarios para mejorar la calidad y confiabilidad del sistema.

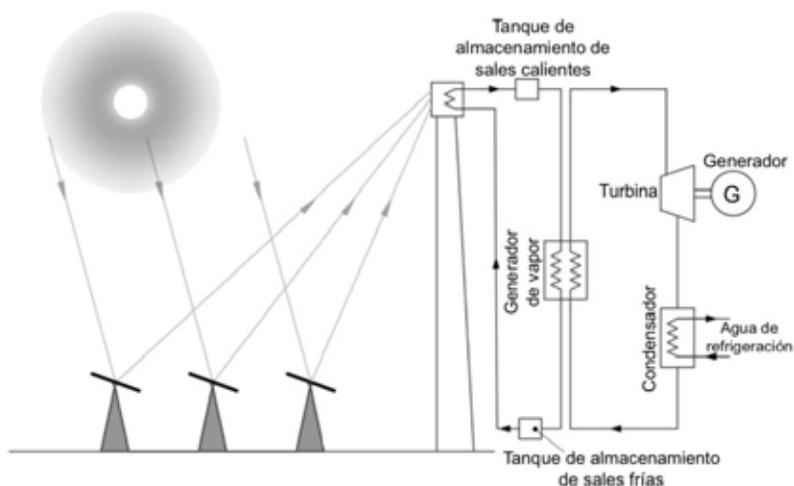
FIGURA 1. SISTEMA FOTOVOLTAICO CON CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO EN UNA INTEGRACIÓN INTELIGENTE AL SISTEMA ELÉCTRICO



Fuente: elaboración propia

En una primera etapa, los sistemas de concentración solar de potencia térmica (CSP) para generación de electricidad convierten la energía solar (solo la radiación directa) en calor (figura 2, sistema heliostatos-torre solar) y, luego, el calor en electricidad por medio de una turbina de vapor. El calor concentrado de los heliostatos se transfiere en la torre solar a un fluido de trabajo que generalmente es una sal en estado líquido o aceite. Esa sal puede transferir calor para generar vapor a alta presión, el que es expandido en una turbina de vapor y, así, genera electricidad. Alternativamente, el calor puede ser «guardado» en estanques de almacenamiento térmico y, luego, su uso puede ser administrado cuando la disponibilidad de recurso solar no sea abundante o esté ausente (por ejemplo, durante la noche), pues desde los estanques se suministra calor a la turbina a vapor. La capacidad de almacenamiento de las plantas CSP permite la generación de electricidad durante la noche e, incluso, una capacidad de generación de 24 horas.

FIGURA 2. SISTEMA CSP EN UNA INTEGRACIÓN INTELIGENTE
AL SISTEMA ELÉCTRICO



Fuente: elaboración propia

Un aspecto que hace más complejo el control de plantas CSP está relacionado con el control de flujo de radiación solar concentrado en la torre solar desde los heliostatos. En una planta de este tipo, las razones de concentración son del orden de mil soles, ya que al tener muchos espejos (heliostatos) que concentran la radiación en un punto, se explica como si fuera equivalente a «recibir muchos soles», en este caso, cerca de mil soles. Esta enorme concentración de radiación solar se convierte en un inconveniente bajo condiciones de nubosidad, ya que el receptor se enfriará cuando las nubes obstaculicen la radiación solar o se calentará rápidamente cuando la radiación solar vuelva a concentrarse, al retirarse las nubes. En casos extremos, los receptores solares de torre se fracturan. Estas condiciones variables se observan durante el amanecer y el atardecer, pero también bajo presencia de nubosidad. Si bien el amanecer y el atardecer pueden anticiparse, la presencia de nubosidad requiere información al instante.

b) Redes inteligentes y microrredes

El concepto de redes inteligentes se posiciona en el usuario, quien, en su nuevo rol, se convierte en una unidad energética que requiere un control preciso de distintos niveles de energía incluyendo producción, uso, almacenamiento e interacción con un nivel mayor del sistema como la red eléctrica.

En términos esquemáticos, una microrred ideal se compone por una unidad habitacional que requiere suministros de electricidad para distintas cargas, como iluminación, climatización y uso de electrodomésticos, entre otros. A su vez, posee capacidad de generación fotovoltaica y de almacenamiento eléctrico. Además, como las cargas de climatización son de carácter térmico (aire acondicionado y calefacción), en una unidad energética inteligente es posible almacenar calor o frío y usarlos cuando sea necesario, es decir, el almacenamiento térmico permite desplazar la demanda. Una unidad de control precisa de la microrred, capaz de optimizar su operación, debe recibir como valor de entrada una predicción de corto plazo del recurso solar, así como información de los costos de la energía —en el caso de tener tarifa variable— y una proyección de consumo. En base a todo lo anterior, esa unidad de control realiza una operación óptima que se rectifica en el tiempo. El sistema «decide» cuándo consumir directamente desde el sistema fotovoltaico o desde la red, así como cuándo almacenar electricidad, calor o frío.

c) Edificios sustentables e inteligentes

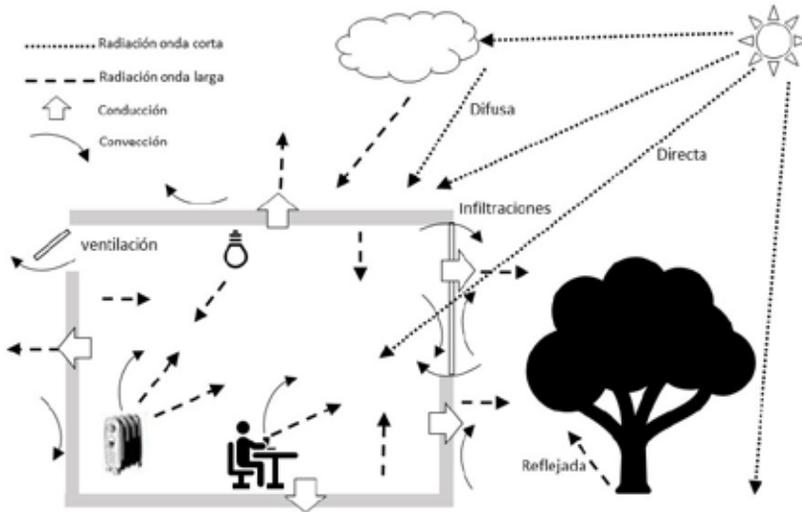
Si proponemos un edificio como sistema, es preciso tener en cuenta que su requerimiento energético puede variar de manera considerable dependiendo del clima local, su diseño, la calidad de los procesos constructivos y la gestión energética. Un edificio es un sistema dinámico ya que influyen aspectos inherentes a su ocupación, como las características de los equipos e iluminación, el comportamiento de los usuarios y las expectativas de confort térmico. La búsqueda de nuevos conceptos para la climatización (calefacción

y refrigeración) en edificios ha hecho proliferar el desarrollo de alternativas de transmisión radiante; el uso de la inercia térmica (acumulación térmica) de los materiales estructurales de un edificio es un ejemplo de aquello.

Una de estas opciones son los sistemas de elementos estructurales térmicamente activados (Thermal Activated Building Systems, TABS), que incorporan la estructura del edificio como parte de la estrategia energética global desde la etapa de diseño. Elementos comunes en la construcción, como hormigón y losas, son utilizados como materiales de almacenamiento de energía, cuyas superficies interactúan con el interior del recinto. Así, proporcionan refrigeración al absorber energía del ambiente interno o calientan el espacio a partir de la energía almacenada. Por ejemplo, es posible utilizar agua para enfriar la masa térmica del edificio de manera nocturna (si este no está ocupado) y así evitar o reducir el requerimiento de enfriamiento cuando se presentan altas temperaturas exteriores.

La carga térmica de un edificio depende significativamente de las condiciones ambientales, tal como se muestra en la figura 4; la radiación solar directa y difusa a la que se expone el edificio juega un rol importante. El sistema TABS depende de la inercia térmica del edificio, por lo que cualquier cambio en ella requiere de varias horas. Por lo anterior, para optimizar el control del sistema TABS es clave un modelo preciso del edificio, que permita predecir su comportamiento futuro en base a una predicción de recurso solar y condiciones ambientales de corto plazo.

FIGURA 3. CARGAS TÉRMICAS EN EDIFICACIONES



Fuente: elaboración propia

2. PREDICCIÓN DEL RECURSO SOLAR

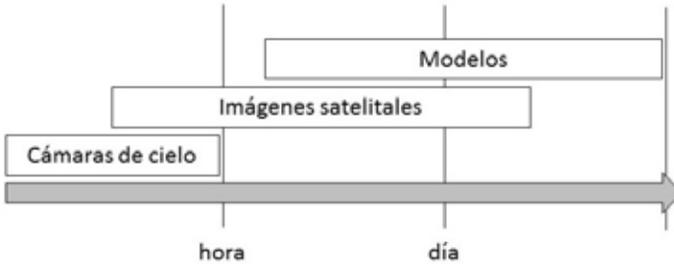
El creciente mercado de las energías renovables en nuestro país y en el mundo hace necesaria una estimación adecuada de los recursos naturales con carácter energético renovable, ya sea de recursos hídricos, eólicos o solares. Esta estimación es particularmente necesaria para una planificación de operación de las plantas de generación eléctrica de carácter variable, es decir, eólicas y solares, con horizontes de predicción de horas y días. La predicción precisa de variables meteorológicas del recurso solar y eólico es un problema que requiere la interacción entre datos en tiempo real (mediciones), imágenes satelitales, modelos computacionales y aplicaciones de técnicas de inteligencia computacional. Por otra parte, se abren nuevos desafíos si se quiere usar selectivamente datos históricos (variables atmosféricas) para predecir el comportamiento bajo particulares circunstancias, con técnicas de aprendizaje de máquinas (o *machine learning*). Si a la medición del recurso energético y su pronóstico en el tiempo se le agrega información de la demanda y la generación

distribuida, es decir, los flujos de potencia eléctrica de todos los consumidores y pequeños generadores distribuidos en el sistema (mediante medidores inteligentes), el desafío de coordinación y optimización del sistema se transforma en un problema computacional que requiere de soluciones novedosas en torno al uso de Big Data.

La medición puntual del recurso solar y eólico no es por sí solo suficiente para predecir la radiación solar que recibe cada colector (térmicos, concentrador o fotovoltaico) en una granja solar. Algo similar ocurre en una granja eólica. Las granjas solares y eólicas muchas veces ocupan varias hectáreas: así se denominan aquellas grandes extensiones de paneles fotovoltaicos, o de aerogeneradores. El recurso solar se ve afectado por nubosidad que no se distribuye uniformemente sobre el campo solar. El recurso eólico es afectado también por la topografía del lugar y las condiciones de viento de la estación meteorológica no necesariamente son replicables en el lugar en que se ubica cada turbina. Para predecir la radiación solar que recibe cada panel en una granja solar, así como la velocidad del viento que recibe cada turbina, se requieren modelos sofisticados con retroalimentación en tiempo real para predecir la disponibilidad del recurso y así estimar de forma precisa la producción de energía de los sistemas. De esta manera se reduce el riesgo financiero asociado a estos proyectos.

Las predicciones del recurso solar son altamente dependientes de la resolución temporal y espacial. Realizar predicciones de disponibilidad del recurso solar promedio en los próximos años y meses no es complejo, pero el desafío se incrementa al reducir la unidad temporal a días, horas y minutos. Las predicciones del recurso solar se pueden calificar en escala de minutos (menor a una hora), variación horaria, variación diaria y de largo plazo. En la figura 4 se presentan los sistemas de predicción de recurso solar disponibles para distintos espacios temporales.

FIGURA 4. SISTEMAS DE PREDICCIÓN DE RECURSO SOLAR

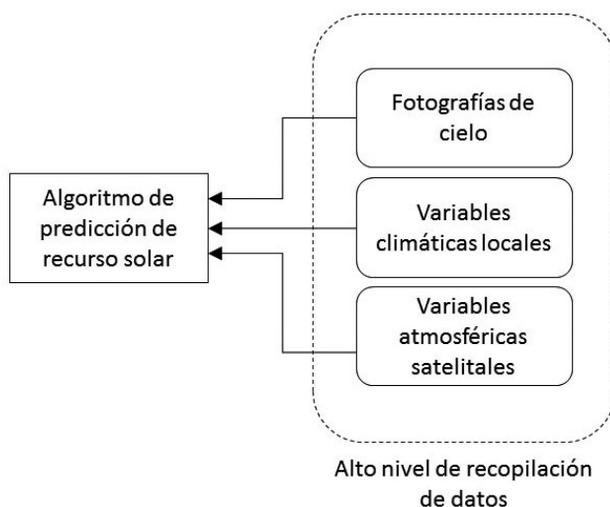


Fuente: elaboración propia

Para predecir el recurso solar en un plazo corto, de hasta 30 minutos, las cámaras de cielo parecen ser la solución más promisoría. Estas cámaras tienen limitaciones, básicamente, por la configuración espacial de la imagen; además, sus aplicaciones son de carácter local. En general, las imágenes satélites son una buena herramienta de predicción para horizontes mayores a una hora, aunque hay limitantes técnicas en la transmisión de datos satelitales que impiden que estos se conviertan en fuentes de información en tiempo real.

Probablemente, la solución para una predicción del recurso solar que aborde distintas escalas de tiempo combinará mediciones en terreno, cámaras de cielo, imágenes satelitales con algoritmos de pronóstico y técnicas de aprendizaje de máquina, como se presenta en la figura 5. El objetivo es que la energía solar, que se caracteriza por ser un recurso renovable de carácter variable, se convierta en un recurso energético predecible y, por lo tanto, gestionable.

FIGURA 5. SISTEMA AUTÓNOMO DE PREDICCIÓN DEL RECURSO SOLAR



Fuente: elaboración propia

Las estimaciones por medio de imágenes satelitales requieren que las metodologías se validen con mediciones de precisión en terreno. En Chile, actualmente no existen suficientes estaciones meteorológicas que midan todas las variables necesarias para caracterizar el recurso solar y con una trazabilidad adecuada. Sí existen estaciones meteorológicas de distintas características y para distintas finalidades. Si bien algunos de los datos de estas estaciones se encuentran disponibles, sus especificaciones no permiten el tratamiento en bruto, necesario para calibración y validación de modelos de alta precisión.

Contamos con tres bases de datos públicas con información de radiación solar en el país. La Dirección Meteorológica de Chile tiene nueve estaciones operativas, según lo disponible en la página web hasta el año 2010, en que se reporta la radiación global horizontal (GHI).

El Archivo Nacional Solarimétrico posee datos de 89 estaciones entre los años 1961 y 1983, cuya información resumida se encuentra

disponible¹. La Agencia de Cooperación Alemana GIZ, en conjunto con el Ministerio de Energía, inició una campaña de medición el año 2008², pero muchas de las estaciones por ellos instaladas han dejado de operar. De acuerdo con lo informado por el propio GIZ, los datos reportados por sus estaciones no poseen precisión científica. Además, hay discrepancias entre las distintas fuentes de información, ya que al ser comparados los datos del Archivo Nacional Solarimétrico, en algunas zonas se encuentran diferencias de hasta un 20 %. En el caso del viento, hay estaciones de la Dirección Meteorológica de Chile y estaciones instaladas por GIZ que reportan mediciones del recurso viento, pero no poseen acceso *online*. La única estación pública de precisión en Chile está instalada en María Elena, operativa desde 2012. Esta estación, denominada Crucero II, es la única que registra radiación normal directa (DNI).

Aun cuando ya se mencionaron previamente en este libro, es preciso recordar dos iniciativas en la estimación de la radiación solar a partir de imágenes satélites. Una de ellas es el Explorador Solar, desarrollado por el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile, que estima el recurso solar en Chile a partir de datos generados por modelos atmosféricos y datos satelitales entre 2004 y 2016. La segunda es el Modelo Chile SR, desarrollado por la Pontificia Universidad Católica de Chile. Ambas iniciativas se encuentran suspendidas.

Si bien el Explorador Solar no proporciona una estimación en tiempo real de la radiación solar, uno de sus grandes valores, además de su disponibilidad en línea, es que permite estimar el año meteorológico tipo (TMY) para cada punto del país. El TMY que proporciona el Explorador Solar se construye de forma estadística a partir de las estimaciones efectuadas entre 2004 y 2016. Un TMY requiere mediciones o estimaciones para un período mayor a 10 años y para cada mes del año se selecciona de forma estadística uno de los datos disponible

¹ UTFSM, CNE y PNUD, *Irradiancia solar en territorios de la República de Chile* (Santiago: editorial, 2008). Disponible en http://www.plataformacaldera.cl/biblioteca/589/articles-64683_documento.pdf

² <http://walker.dgf.uchile.cl/Mediciones/>

por cada mes (entre, al menos, 10), que represente de mejor forma ese mes. En general, los TMY se consideran buenos predictores de los valores promedio mensual y anual, pero no representan bien los extremos y se utilizan en la evaluación técnica económica de nuevos proyectos de plantas solares. Las entidades financieras los utilizan como parámetro base para la validez de sus análisis.

De esta manera, la predicción del recurso solar se vuelve decisiva en relación con la extensión y proliferación de sistemas inteligentes que involucren el uso de la energía solar. No basta con desarrollar microrredes eficientes, ni con extender la construcción de sistemas inteligentes, también es necesario avanzar en la generación e integración de datos en relación con el recurso solar. Lo anterior indica que, si bien en Chile existen altos niveles de radiación solar, la tecnología asociada a la energía solar y las políticas que se desarrollen en torno a ellas es tan relevante como la disponibilidad del recurso mismo.

II. IMPACTO DE UNA PENETRACIÓN MASIVA DE LA ENERGÍA SOLAR EN CHILE

Chile es un país rico en recursos naturales. Históricamente hemos aprovechado esta riqueza a través de la extracción de minerales, tales como el salitre y el cobre. Asimismo, hemos ocupado nuestras condiciones únicas para ser un productor relevante de frutas, celulosa, vino y salmón. A esta lista se ha sumado la posibilidad de hacer uso de nuestros recursos renovables para la generación de energía, en particular de la energía solar. El potencial solar se estima en 1.800.000 MW de capacidad de generación eléctrica, de los cuales solo hemos aprovechado 2.400 MW. En la Figura 6 se puede observar el potencial de generación por región según tecnología.

FIGURA 6. POTENCIA DE GENERACIÓN PROYECTADO
POR REGIÓN Y TECNOLOGÍA³

Región	Potencial disponible								Cartera proyectos Eólicos		Total
	CSP		Fotovoltaico seguimiento 1 eje		Hidroeléctrico		Eólico		MW	F.P.	
	MW	F.P.	MW	F.P.	MW	F.P.	MW	F.P.			
Arica y Parinacota	6.311	0,51	36.647	0,32							42.958
Tarapacá	136.085	0,51	168.098	0,32							304.182
Antofagasta	390.476	0,53	883.651	0,33			14.101	0,36	339	0,38	1.288.566
Atacama	15.607	0,51	171.707	0,34			86	0,34	533	0,34	187.933
Coquimbo			3.240	0,31			389	0,36	777	0,35	4.406
Valparaíso			64	0,30	104	0,75					168
Metropolitana					840	0,65					840
O'Higgins					722	0,61	75	0,34			798
Maule					2.127	0,55					2.127
Bio Bio					3.152	0,62	4.581	0,33	419	0,32	8.152
Araucanía					1.828	0,66	1.933	0,33	407	0,38	4.169
Los Ríos					2.610	0,67	2.863	0,35	51	0,39	5.524
Los Lagos					1.088	0,64	13.448	0,34	428	0,39	14.964
Total	548.478	0,52	1.263.407	0,33	12.472	0,63	37.477	0,34	2.975	0,36	1.864.809

Consecuentemente, y aunque seamos responsables de apenas el 0,25% de las emisiones globales, tenemos una oportunidad única de ofrecer al mundo nuestro potencial solar para abordar en forma efectiva la acción contra el cambio climático y mitigar los efectos nocivos que este ya está provocando, particularmente en países vulnerables y de ingresos bajos.

La iniciativa chilena puede unirse a otros esfuerzos internacionales con ideas propias y creativas. El potencial solar de 1.800.000 MW de capacidad de generación eléctrica disponible en Chile podría cubrir cerca del 20% de la demanda mundial de electricidad, mientras que nuestra demanda eléctrica es en torno al 1,3% de este

³ Tabla de elaboración propia, construida a partir de la información disponible en *Energías renovables en Chile. El potencial eólico, solar e hidroeléctrico de Arica a Chiloé*. (Santiago: Ministerio de Energía / GIZ, 2014).

potencial (es decir, el potencial solar es 65 veces nuestro consumo eléctrico actual).

Las estrategias básicas para lograr una masificación de tecnologías de generación solares, y así dar uso al potencial solar para generación eléctrica en Chile, incluyen diversos aspectos que trabajaremos a continuación:

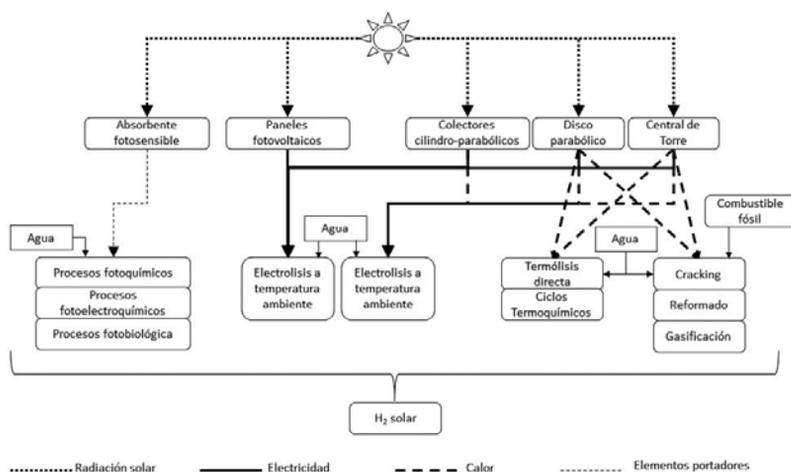
- Disponer de un modelo robusto de desarrollo sostenible local y de uso adecuado de nuestro territorio e institucionalidad, que conviertan a Chile en el lugar más atractivo para estos desarrollos.
- Exportar energía a través de interconexiones eléctricas internacionales y combustibles solares como el hidrógeno.
- Desarrollar redes inteligentes, con alta penetración de generación distribuida y microrredes, con almacenamiento de energía y capacidad de gestión optimizada del sistema (gestión de demanda).
- Convertir el sistema de transporte (urbano, interurbano e industrial) basado en combustibles fósiles a transporte eléctrico.
- Atraer industria mundial intensiva en el uso de energía al norte de nuestro país, que incluye jugar un rol clave en soluciones sostenibles de economía circular.
- Desalar agua con energía solar para posibilitar la forestación, uso agrícola, uso industrial y otras actividades clave.
- Generar una cultura de sostenibilidad para constituirnos en un polo de investigación e innovación en estas materias, de manera de asegurar la sostenibilidad de esta oferta al mundo.

Hidrógeno solar

El hidrógeno (H_2) es un portador energético que no está disponible en su estado puro en la naturaleza, pero puede ser obtenido desde otros compuestos tales como agua (H_2O) y otras materias primas. *Hidrógeno solar* se denomina al hidrógeno producido únicamente mediante energía solar. La energía solar ofrece variadas formas de

producir y hacer uso del hidrógeno como portador energético y materia prima para diversos procesos. Esto es factible de lograr a través de distintas técnicas de electrólisis, uso directo de luz y *shock* térmico. A través de estas técnicas vinculadas a la energía solar, el hidrógeno puede ser usado directamente en aplicaciones finales, en el almacenamiento de energía solar o bien en la fabricación de combustibles solares. Se espera que en el mediano plazo los costos de estas tecnologías sean competitivos, de manera de habilitar una matriz energética 100% renovable en el país. Las condiciones excepcionales de radiación en Chile permiten tener ventajas comparativas en la mayoría de estas soluciones⁴.

FIGURA 7. PROCESOS DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO SOLAR⁵



La exportación de combustibles solares también puede llegar a ser un foco de desarrollo, en la medida que las soluciones de almacenamiento y transporte intercontinental de hidrógeno en grandes

⁴ International Renewable Energy Agency, *Hydrogen from Renewable Power: Technology Outlook for the Energy Transition* (Abu Dhabi: IRENA, 2018).

⁵ Diagrama de elaboración propia, construido a partir de la información en M. J. Montes, A. Abánades y J. M. Martínez-Val, *Energía sostenible*. Disponible en <http://www.energiasostenible.net/DVD/H2solar.pdf>

volúmenes estén disponibles. En este sentido, las opciones de usar portadores energéticos como amoníaco o metanol verdes está, económicamente, más cerca.

Se estima que, hacia el año 2030, 326.000 toneladas por año de hidrógeno verde producido en Chile se podrían usar en refinerías para sustituir importaciones de derivados de hidrógeno, para ser inyectados en redes de gas natural, para transporte de minería del cobre, para transporte de carga y buses interurbanos, así como en co-combustión (*cofiring*) en centrales de gas y combustible para refinerías. La producción de este volumen de hidrógeno verde requeriría un estimado de 7,1 GW de instalaciones fotovoltaicas, lo que representa el 0,4% del potencial total de 1.800GW.

Entonces, utilizando apenas una pequeña porción del potencial solar del país (5,1%), sería posible transformar la producción de hidrógeno, que a su vez contribuiría a la conversión de la matriz energética del país en una de energías renovables⁶.

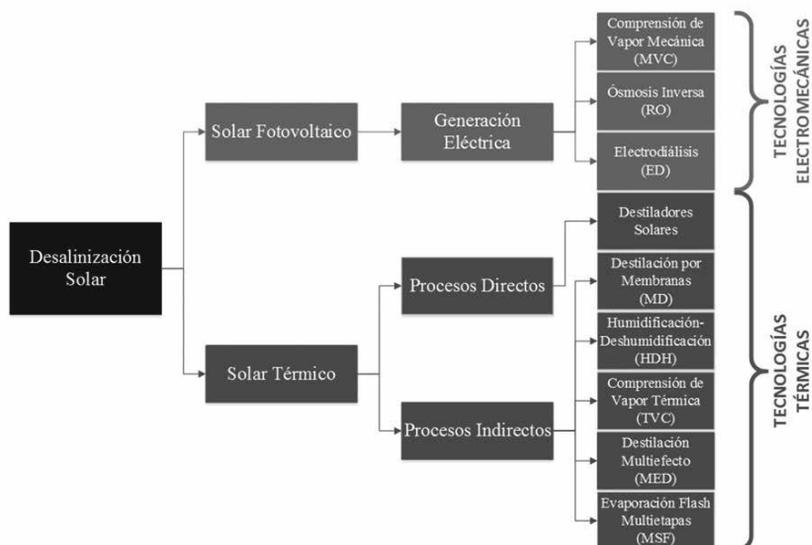
Provisión de agua

Es habitual escuchar sobre los riesgos que experimenta la disponibilidad de agua dulce a nivel mundial. Chile no es una excepción, pero, en este caso, la abundancia de energía solar, así como el acceso a agua de mar a lo largo de nuestra costa, son una oportunidad para aumentar la disponibilidad de agua potable en Chile.

Los mecanismos para desalar agua son diversos. La tabla 2 muestra una clasificación de los procesos de desalación disponibles y compatibles con energía solar.

⁶ De este modo, se trataría de una transformación e incremento de la producción de hidrógeno generando un nuevo sector económico de exportación tan importante como la minería con una operación anual en torno a los 8.000 millones de dólares. CDT Indata para Comité Solar e Innovación Energética Corfo, *Informe Final: «Construcción de una estrategia para el desarrollo del mercado de hidrógeno verde en Chile a través de Acuerdos Público Privados»*, agosto 2019.

FIGURA 8. CLASIFICACIÓN DE PROCESOS DE DESALACIÓN COMPATIBLES CON ENERGÍA SOLAR⁷



En todos los procesos de desalación presentados, la energía solar puede participar entregando energía eléctrica o calor. Alternativamente, es posible realizar tratamiento solar de agua, lo que es clave para la descontaminación y desinfección del agua del proceso o de cursos naturales que contienen materiales no aptos para el consumo humano o agrícola. El desarrollo de sistemas económicos de tratamiento de agua puede tener un gran impacto en la conversión del borde costero en Chile para la agricultura, plantaciones, forestación y asentamientos humanos.

La energía solar no solo sirve para el tratamiento de agua en términos de desalación, desinfección y descontaminación, también puede ser clave para reducir la huella de carbono de su provisión. Es decir, la provisión de energía puede ser de otro tipo, pero con el uso

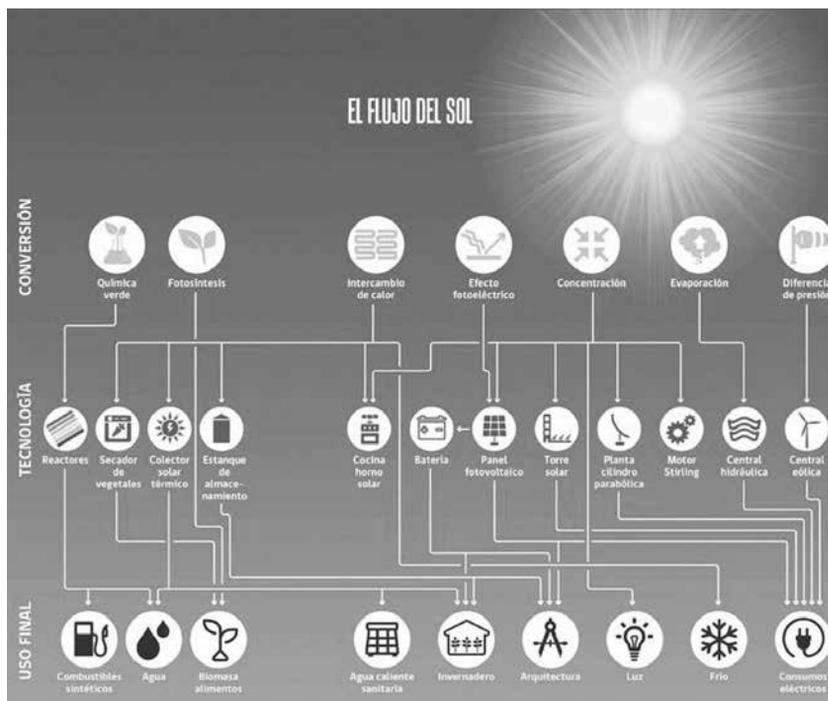
⁷ David Saldivia et al., «Computational analysis for a multi-effect distillation (MED) plant driven by solar energy in Chile, *Renewable Energy* 132 (2019): 206-220. Disponible en <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148118309364>

de energía solar se contribuye a la matriz energética renovable. Por otra parte, una vez tratada, el proceso de llevar el agua a sectores de uso agrícola o industrial puede ser realizado a través de bombeo solar, es decir, accionamientos eléctricos y bombas de agua energizadas a partir de energía solar. De esta manera, el ciclo del agua, desde su tratamiento hasta el uso, podría ser realizado de manera sostenible.

Uso en comunidades

Si comparamos la energía solar con otras fuentes energéticas, una de sus características particulares es que se encuentra disponible en todas las regiones habitadas del globo. Si bien su distribución no es uniforme ni tiene la misma calidad en todas las latitudes, es una de las fuentes de energía de menor concentración geopolítica, haciéndola fácilmente accesible por parte de las comunidades. Por ello, y siguiendo la tendencia de disminución de los costos de las tecnologías solares tanto fotovoltaicas como de concentración solar térmica, es que se visualiza una masificación de soluciones solares productivas asociativas de pequeña y mediana escala. En otras palabras: no se trata solo de las grandes plantas fotovoltaicas. La energía solar ofrece múltiples opciones de uso final (ver figura 8) a través de distintos mecanismos de conversión y tecnologías apropiadas, muchas de ellas inexploradas hasta el momento.

FIGURA 9. SOLUCIONES TECNOLÓGICAS DE PEQUEÑA Y MEDIANA ESCALA PARA CONVERSIÓN Y USO DE ENERGÍA SOLAR A NIVEL DOMICILIARIO Y COMUNIDADES⁸



Al considerar el potencial de la energía solar en Chile, es necesario desmitificar un concepto: la solución no radica en generar únicamente proyectos de gran envergadura. El uso de esta energía en casas, barrios, comunas y pequeña industria contribuye a crear el entramado necesario para que Chile se pueda convertir en una real potencia solar. La generación distribuida y las microrredes parecen señalar un rumbo claro y con un inmenso potencial. Se trata de un sol desde arriba (que vinculamos a las grandes plantas solares) hacia abajo (que radica en las soluciones comunitarias), y viceversa, que recorre múltiples opciones entregando sus beneficios en la perspectiva de un desarrollo sostenible para Chile y la región.

⁸ Ayllu Solar - SERC Chile, *La fuerza del sol* (Santiago: SERC Chile, 2017).

En este ámbito, la creación de bienes públicos que permitan remover las barreras de desarrollos de estas aplicaciones es clave: permisos, diseños eficientes, esquemas asociativos, modelos de negocio, cultura energética, buenas prácticas en labores de mantenimiento y operación, seguridad y capacitación de proveedores, entre otros. De esta forma, paulatinamente se dispondrá de soluciones más efectivas, en términos de costos, y sostenibles, en ámbitos tan diversos como la agricultura, el turismo, la acuicultura, la ganadería, la electromovilidad y la pesca. Un ejemplo de estos esfuerzos es el proyecto Ayllu Solar (www.ayllusolar.cl).

Si el uso de energía solar se masifica de este modo, puede reemplazar de manera relevante tanto los consumos eléctricos actuales como los consumos de otro tipo de energía en ciudades y poblados.

Exportación de energía

Si pensamos en una escala mayor, en exportación de energía, se añaden otras variables. Para que Chile evolucione hacia ser un país exportador de energía, requiere de sistemas de transmisión que puedan ser desarrollados a costos razonables y en los tiempos requeridos. La interconexión energética con los países vecinos es un factor clave, por ello, sería necesario explorar de qué forma las matrices energéticas de los países se pueden complementar de manera sinérgica y con una visión de sostenibilidad.

Latinoamérica, Chile en particular, ha abordado estos desafíos aun de manera muy incipiente. La interconexión del Sistema Interconectado Nacional con el Sistema Argentino de Interconexión (SADI), en marzo de 2016, fue un primer paso en la perspectiva de una interconexión regional. Esta visión se materializaría a través de corredores energéticos a lo largo de la costa del océano Pacífico, a lo que debería sumarse Brasil y Argentina; lo anterior da la posibilidad de tener una capacidad instalada de energía solar en torno a los 200.000 MW (es decir, 200 GW).

Esto sería cerca de 10 veces toda la capacidad instalada hoy en el país, y equivaldría a poder abastecer un 30% del consumo

eléctrico de Sudamérica para el año 2030. Esta capacidad ocuparía además una superficie cercana a los 6.000 km²⁹, considerando un promedio de 3 hectáreas por MW (valor que corresponde al promedio de uso de espacio de los proyectos solares presentados al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental), en espacios de 15 emplazamientos de 20 x 20 km², por ejemplo. Exportar energía no solo es clave para aumentar la capacidad de generación de energía solar (tanto fotovoltaica como de concentración solar de potencia) y, de esa manera, aprovechar mejor el recurso disponible en el norte del país, sino que, al estar interconectado con otros países, permite flexibilizar y robustecer el sistema eléctrico nacional. Si pensamos en fuentes de energía más diversas y de mayor escala, que incluyan, por ejemplo, una gran proporción de energía hidroeléctrica proveniente de Brasil, se podría reducir la necesidad de almacenamiento, mejorar la estabilidad del sistema y mitigar fallas (fluctuaciones de frecuencia, caídas de tensión, etcétera), entre otras oportunidades.

Alternativamente, la exportación de energía solar puede materializarse con producción de combustibles solares e hidrógeno, tal como se comentó antes. En ambos casos, los desafíos en las relaciones internacionales son enormes y solo factibles convirtiéndolos en políticas de Estado que trasciendan los consecutivos períodos de gobierno. Para lo anterior se requiere de esfuerzos en el ámbito de tratados internacionales, marcos normativos y modelos de desarrollo conjuntos entre países de Latinoamérica y otros socios estratégicos a nivel internacional.

Minería y energía solar

La minería ha sido, históricamente, una actividad clave en la economía nacional. Por esto, es posible sostener que la actividad minera acompañará el desarrollo económico de varias regiones del país hasta que los recursos minerales se agoten, su extracción no sea rentable, o bien, hasta que dichas actividades se limiten por el

⁹ Como referencia, la superficie total de viñedos en Chile se estima en 2.000 km².

impacto socioambiental que puedan causar. La energía solar puede contribuir positivamente a abordar algunos de los desafíos que presenta el desarrollo actual de la actividad minera. Una producción minera con menor huella de carbono abre posibilidades de expandirse a mercados cada vez más exigentes en materia ambiental.

A modo de ejemplo, en relación con los relaves mineros, se realizaron dos estudios, los que se concentraron en el cálculo del costo nivelado de la energía (LCOE) y análisis de ciclo de vida (LCA) para la producción de cobre en Chile, y otro de LCA para la producción de hierro¹⁰. Estas investigaciones, junto a otros desarrollos, permiten idear soluciones de integración de energía solar en el proceso minero. La reciente inauguración del Centro Nacional de Pilotaje de Tecnologías para la Minería¹¹ permitirá probar y validar varios conceptos en esta área.

Existen sectores industriales y empresas que están comenzando a considerar la trazabilidad de la huella de carbono en el desarrollo de sus productos, con lo cual, bajar la huella de carbono de la producción de metales a nivel nacional resulta clave, para poder ser competitivos en una economía cada vez más carbono-consciente. Se prevé que en tanto los tratados internacionales sobre mitigación de cambio climático cobran más relevancia, este efecto se irá incorporando en la industria.

Si bien lo anterior es un gran desafío para el sector minero nacional, es también una gran oportunidad para la innovación en tecnología y procesos, desarrollos que a su vez pueden ser exportados a otros países mineros, incluso otros sectores productivos. De este modo, no solo se captura valor a través de la reducción de la huella de carbono del sector minero, sino que podría ser una forma de incrementar la economía basada en conocimiento del país.

¹⁰ Gustavo Díaz-Ferrán et al., *Carpe Solem. Solar Mining Opportunities for Chile. A review from science*, Technical Report, June 2019, DOI: 10.13140/RG.2.2.32269.28644

¹¹ <https://pilotaje.cl>

A MODO DE CONCLUSIÓN: ATRACCIÓN DE INDUSTRIA CON HUELLA DE CARBONO CERO

No cabe duda de que la exportación de energía solar puede abrir un mercado insospechado de oportunidades de desarrollo de la energía solar en Chile. Sin embargo, atraer nuevos consumos cerca de las zonas de producción masiva de energía solar, es decir, en el desierto de Atacama, puede tener un impacto mucho mayor en el país. Industrias de todo el mundo podrían instalarse en la región buscando el atributo de ofrecer productos con huella de carbono cero, o bien, con un fuerte componente de sostenibilidad. Lo anterior, sumado a precios muy bajos de la energía, convertirían al norte de Chile en un polo de producción mundial. El potencial de desarrollo de esta opción es ilimitado. Se pueden establecer diversos escenarios a partir de los contextos de consumo industrial en la APEC, llegando a valores que pueden superar los 200 GW a los ya contemplados en exportaciones a través de las redes eléctricas. En este marco, resulta de gran interés que Chile se posicione en una visión de economía circular: con energía solar (eléctrica y calor) y una buena infraestructura de puertos, carreteras y ferrocarriles, es factible proponer la recuperación de materiales en la zona norte del país. Esto podría llegar a representar el uso de cerca de un tercio del potencial solar de Chile, es decir 600 GW. Estos escenarios de masificación de la penetración de energía solar debieran incidir en un cambio estructural de nuestra economía: en ello se incluye un fuerte desarrollo productivo, pero también puestos de trabajo con alto nivel de especialización, así como la creación de ciencia de excelencia en la materia. En consecuencia, estaríamos considerando formación de innovadores, servicios asociados, técnicos especializados, enseñanza en colegios y comunidad en general, entre otros.

Un ejemplo de esta oportunidad son los Data Centers. La industria de los datos se encuentra en una fase de expansión; se prevé que, con el aumento de aplicaciones de inteligencia artificial, transporte autónomo, redes sociales, etcétera, siga creciendo. Por ello, se trata de una de las industrias con mayor expansión de su huella de carbono, tanto así que existe una correlación cuadrática

entre la cantidad de datos procesados por segundo y su huella de carbono. En contraste, una vez procesados los datos, el transporte de información se realiza mediante fibra óptica, lo cual resulta muy eficiente y de bajo consumo energético. Se podría pensar, entonces, que otra forma de exportar energía sería mediante la importación y exportación de datos, en donde el procesamiento, el proceso más intensivo en uso energético, es realizado mediante energía solar en el desierto. Este es un ejemplo, entre muchas industrias y productos, que podrían ser energizados de manera costo-efectiva en el norte de nuestro país.

Otro ejemplo clave para el aumento de demanda de energía solar y descarbonización es la conversión del transporte en base a combustibles fósiles a transporte eléctrico. El transporte urbano, interurbano e industrial corresponde al 31,6% del consumo energético de la humanidad, mayormente desde fuentes fósiles. Incorporar el transporte a la matriz eléctrica podría, en caso de que esta sea cada vez más renovable, reducir considerablemente la huella de carbono de este sector. El desarrollo tecnológico actual favorece el uso de baterías electroquímicas para el transporte privado (vehículos eléctricos) y público urbano (buses, metros y tranvías eléctricos), mientras que el transporte público interurbano e industrial emplearía mayoritariamente celdas de combustible en base a hidrógeno. Si este último es producido también mediante energía solar, sería otro factor importante para el aumento de demanda en energía solar.

Con esto, planteamos que Chile podría ser no solo un actor relevante a nivel internacional en materia de energía solar, sino que puede transformarse en uno de los países clave para la sostenibilidad de varios sectores industriales, cuyo impacto puede trascender sus fronteras. Es más, Chile puede ser uno de los países clave en una economía poscarbono. Todo gracias a su enorme potencial solar.



CAPÍTULO 8 CONCLUSIÓN

ENERGÍA SOLAR, SU HISTORIA Y SU FUTURO

Cecilia Ibarra^{*}, *Bárbara Silva*^{**} y *Mauricio Osses*^{***}

En los últimos años, en especial desde 2010 en adelante, hemos podido observar una nueva etapa en el desarrollo de la energía solar en Chile. Por una parte, las políticas públicas comenzaron a poner atención al sector de las energías renovables¹ y, por otra, las condiciones económicas y las visiones han cambiado, permitiendo que la energía solar sea vista como una alternativa estratégica de la denominada «revolución energética»². Esta nueva etapa ha coincidido con programas de políticas públicas para el desarrollo de capacidades científicas y tecnológicas en el área. En este ámbito, destaca la fundación de SERC Chile en 2010 (Solar Energy Research Center, centro Fondap de Conicyt), un espacio en el que se han vinculado varios de los autores de este libro.

Las épocas de bonanza son propicias para invertir en desarrollo tecnológico e innovación que luego estarán disponibles en períodos

^{*} Centro de las Ciencias del Clima y la Resiliencia (CR2), Universidad de Chile.

^{**} Departamento de Historia, Facultad de Filosofía y Humanidades, Universidad Alberto Hurtado.

^{***} Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Técnica Federico Santa María.

¹ Ministerio de Energía, *Energía 2050. Política Energética de Chile* (Santiago: Ministerio de Energía, 2015).

² Hugh Rudnick y Rodrigo Palma, «Contexto nacional e internacional», en *Revolución energética en Chile*, editado por Máximo Pacheco (Santiago: Ediciones Universidad Diego Portales, 2018), 19-39.

futuros³. Nuestra propuesta es que también es conveniente invertir tiempo y esfuerzo en comprender los procesos de desarrollo de la investigación científica, el cambio tecnológico, los períodos de intermitencia y los derroteros seguidos en la difusión y uso de la ciencia y las tecnologías relacionadas con el sol en Chile.

Los altibajos del desarrollo de la energía solar en los últimos 120 años nos hacen preguntarnos qué podemos aprender de la historia chilena, que nos ayude a comprender la etapa actual y a cuidar su bonanza. Es posible que encontremos lecciones de experiencias anteriores, que entendamos razones de la lenta difusión y adopción de las tecnologías solares en Chile, y que estos conocimientos permitan prevenir obstáculos para una nueva oportunidad de crecimiento. Asegurar los aprendizajes del pasado es una apuesta riesgosa, pero recuperar esas historias, analizarlas y reflexionar sobre ellas, nos hace más conscientes de esto: los científicos e ingenieros solares chilenos tienen ancestros, una filogenia que los conecta y que les permite construir su identidad profesional.

Creemos que esa pertenencia puede ser inspiradora para las nuevas generaciones, por ejemplo, al ver que en Chile se ha desarrollado ciencia y tecnología en el área. Los jóvenes que se integran a la comunidad solar no necesariamente conocen su historia. Los profesores guía de las nuevas tesis solares —muchos de ellos, autores de este libro— comentan que, en los escritos de sus alumnos, es común encontrar afirmaciones tajantes, como por ejemplo: «no hay mediciones de radiación en Chile» o «el desarrollo de la energía solar chilena comenzó en el siglo XXI». Entonces, un texto como este puede convertirse en un punto de partida para los nuevos miembros de la comunidad solar.

La permanencia de la memoria no es evidente ni está asegurada. La comunidad chilena que se agrupa en torno a la energía solar ha mostrado conciencia de su historia, también preocupación por escribir y reconocer los trabajos realizados por sus antecesores. Podemos observar ese interés ya a mediados del siglo XX, por ejemplo,

³ Carlota Pérez, «Cambio tecnológico y oportunidades de desarrollo como blanco móvil», *Revista de la Cepal* 75 (2001): 115-136.

en el trabajo de Julio Hirschmann sobre las iniciativas de Charles Wilson en el siglo XIX, o en las diversas referencias de artículos del siglo XXI a los registros del Observatorio Montezuma en la década de 1920, o al propio trabajo de Hirschmann entre los sesenta y setenta. La mantención de este interés y su desarrollo como una fuente de reflexión crítica se facilita si hay materiales bien documentados y contruidos con un enfoque de investigación histórica. Esa ha sido la intención de este trabajo.

Sostenemos que el libro llena un vacío porque el material escrito sobre el desarrollo de la energía solar en Chile es escaso. Están los trabajos de Arellano⁴ y el libro de investigación periodística editado por SERC Chile⁵, que invita a aprender de la energía solar y de la riqueza del recurso en el norte chileno. También hay textos que presentan visiones de futuro para el sector en esta nueva etapa de crecimiento de la energía solar, entre los que destaca la propuesta de Palma y Pacheco⁶.

Este libro contribuye a la comprensión de la historia de la energía solar en Chile desde la perspectiva del registro histórico, pero construido con múltiples especialistas: ingenieros, científicos, técnicos, investigadores y profesionales que participan o han participado de la actividad solar chilena. Como se ha discutido en el capítulo introductorio, el trabajo de profesionales de distintas disciplinas ha permitido desarrollar un relato que tiene valor histórico, en cuanto trasciende los testimonios de los actores, al complementar y contrastar referencias, usar distintas fuentes y dar contexto al relato con hechos que contribuyen a situarlo.

El relato sobre los beneficios de la energía solar tiene una dinámica que se acopla a las necesidades y circunstancias de cada época.

⁴ Por ejemplo, Nelson Arellano Escudero, «Para bien de la humanidad: Julio Hirschmann Recht (1902-1981) y la energía solar en Valparaíso», *Historia* 396 3: 1 (2014): 11-34.

⁵ SERC Chile, *Memoria Institucional SERC Chile 2013-2017* (Santiago: SERC Chile, 2018).

⁶ Rodrigo Palma y Máximo Pacheco, «Chile: 'capital del Sol'», en *Revolución energética en Chile*, editado por Máximo Pacheco (Santiago: Ediciones Universidad Diego Portales, 2018), 539-552.

En las plantas desalinizadoras de fines del siglo XIX⁷ la tecnología solar se aprovechaba en el mismo lugar o muy cerca, y solucionaba la necesidad de acceso al agua de comunidades y faenas productivas aisladas. En este sentido, era un uso «desconectado» de otros sistemas productivos y ligado directamente al territorio donde se desarrollaba, y estratégico, en cuanto solucionaba una necesidad central. En el transcurso del siglo XX, ese desafío de desplazamiento de la energía solar ha sido abordado desde distintas estrategias, y aún está en desarrollo. Lo que ha quedado en claro es que las posibilidades de aprovechar la energía solar son muchas⁸, y por ello también ha tenido espacio en la política energética del Chile actual, enfocada en la generación de energía eléctrica, principalmente en un sistema interconectado⁹.

Las políticas públicas, o su ausencia, han tenido importantes efectos en el desarrollo de la energía solar¹⁰. Por ejemplo, el rol del Estado y de las empresas públicas en generar demanda en las etapas incipientes del desarrollo tecnológico ha sido clave, en tanto ha permitido un espacio para la experimentación. El posterior giro hacia un modelo económico en el que la rentabilidad es la condición básica para el desarrollo de las tecnologías solares determinó el fin de esa etapa de generación de demanda pública y el incipiente desarrollo de los colectores solares para agua caliente sanitaria, que resultaban competitivos en los años ochenta. El foco del discurso de la política energética del siglo XXI en la generación eléctrica va de la mano con el desarrollo de proyectos fotovoltaicos de gran envergadura.

El desarrollo y cambio tecnológico que observamos en la energía solar en Chile evoluciona junto con la manera en que se toman decisiones de inversión, los discursos dominantes, la forma en que se

⁷ Nelson Arellano Escudero, «La investigación y desarrollo de la energía solar en Chile (1872-1958)», en este volumen.

⁸ Miriam Roth, Pedro Sarmiento y Cecilia Ibarra, «Tecnologías de transformación de energía solar y algunas aplicaciones», en este volumen.

⁹ Ministerio de Energía, *Energía 2050. Política Energética de Chile* (Santiago: Ministerio de Energía, 2015).

¹⁰ Roberto Román y Cecilia Ibarra, «El desarrollo de la energía solar en Chile, una visión integradora», en este volumen.

implementan estas decisiones, los actores involucrados y sus roles, es decir, con el sistema de gobernanza del sector. Esto coincide con lo que se ha observado en los grandes procesos de cambio tecnológico que han marcado las revoluciones industriales¹¹.

Los actores y sus grados de intervención y relevancia cambian a lo largo del tiempo. Por ejemplo, las plantas desalinizadoras del siglo XIX fueron emprendimientos privados escasamente conectados a las políticas públicas, donde el rol del experto fue clave¹². En el siglo XX la investigación solar se circunscribió a las universidades, y su impacto ciudadano fue limitado, hasta que las tecnologías solares incidieron en la elaboración de aplicaciones para utilizar en la vida cotidiana. En el proceso de cambio tecnológico interactúan Estado, expertos, sector productivo, comunidades y territorios involucrados.

Las comunidades y territorios que han experimentado y aprovechado la energía solar en Chile son diversas, desde los desarrollos de tecnologías socialmente apropiadas (TSA) de los ochenta, que aún se mantienen, en paralelo con el desarrollo de grandes instalaciones de producción de energía para el sector minero. El Estado ha dado incentivos para la dirección del cambio tecnológico en el sector, por ejemplo, con la ley eléctrica, que exige a las empresas distribuidoras un 10% de generación con energías renovables¹³. Incentivos como este, así como otros instrumentos de políticas públicas, van guiando las decisiones que repercuten en la forma que toma el sector, en las capacidades que se desarrollan y las tecnologías que crecen.

Los científicos, técnicos y profesionales solares chilenos han tenido conciencia de la relación entre la gobernanza del sector y la dirección del cambio tecnológico y se han organizado trabajando de manera coordinada, al tiempo que se han hecho parte de la red internacional de expertos. No obstante, su influencia en las políticas

¹¹ Nick Von Tunzelmann, «Historical Coevolution of Governance and Technology in the Industrial Revolutions», *Structural Change and Economic Dynamics* 14 (2003): 365-384.

¹² Arellano Escudero, «La investigación...».

¹³ Ley 20.257, introduce modificaciones a la Ley General de Servicios Eléctricos respecto de la generación de energía eléctrica con fuentes de energías renovables no convencionales, 2008.

públicas chilenas a lo largo de la historia ha sido limitada. La cruzada de la asociación internacional, ISES, para posicionar estratégicamente a la energía solar en la política medioambiental, no tuvo eco en políticas y programas para el fomento del sector en Chile¹⁴.

Desde 2010, el interés por insertar la energía solar en políticas públicas ha sido más evidente¹⁵. También hay un cambio en la disposición de otros actores hacia la energía solar: por una parte, la ciudadanía ha tomado cierta conciencia del cambio climático. Por otra, con el mayor grado de desarrollo y baja de costos, el sector privado puede ver a las tecnologías solares como una opción rentable y, tal vez, valorar su aporte a la responsabilidad social empresarial, o bien, a su posicionamiento con clientes preocupados por el medio ambiente. Estas condiciones abren una oportunidad para el aprovechamiento de la energía solar.

La competencia con otras fuentes de energía ha sido de algún modo desleal, ya que los precios de los combustibles en base a carbono no consideran los costos de reparación de los daños ambientales que producen, o las pérdidas, cuando ya no hay posibilidad de reparación. Si se consideraran las externalidades, hace muchos años que la energía solar sería competitiva. Ya es tiempo de considerar estos aspectos, en tanto el costo de esperar es demasiado alto. Las distintas fuentes de energía pueden complementarse y contribuir a tender puentes entre nuestra situación actual, con alta dependencia de combustibles fósiles, y un futuro basado en energía limpia; un futuro donde la energía solar sea naturalmente nuestra primera opción en regiones con abundante radiación.

La discontinuidad que se ha vivido en establecer un mercado para la energía solar en Chile necesariamente ha impactado en el desarrollo de capacidades. Esta nueva etapa se beneficiaría de acciones decididas de apoyo al sector por parte de las políticas públicas.

¹⁴ David Mills, «The International Solar Energy Society. The Second 25 Years, 1980 to 2005», en *The Fifty-Year History of the International Solar Energy Society*, editado por Karl W. Boer (Boulder: American Solar Energy Society, Inc., 2005).

¹⁵ Máximo Pacheco, ed., *Revolución energética en Chile* (Santiago: Ediciones Universidad Diego Portales, 2018).

Las tecnologías solares presentan múltiples oportunidades para la superación de problemas de equidad en el acceso a servicios como el agua caliente sanitaria y el confort de las viviendas. Asimismo, ofrece ventajas para la gestión ambiental de los grandes productores, por ejemplo, en la minería, y para las transformaciones en el contexto del cambio climático.

El aprendizaje y la acumulación de capacidades toma tiempo, por ello necesita horizontes de tiempo amplios. Hay que empezar hoy a cultivar las capacidades que deseamos tener en veinte años más y apoyar programas que tengan continuidad y generen desarrollos y efectos demostrativos. El crecimiento del sector en los años ochenta inspiró a algunos ingenieros a realizar su doctorado en especialidades vinculadas a la energía solar. Sin embargo, la «depresión» del área solar en los años noventa llevó, a muchos de ellos, a desarrollar sus carreras en gestión ambiental, cambio tecnológico y máquinas térmicas, entre otros. Con esto, el país desaprovechó a personas especializadas porque las capacidades, que incluyen a las redes de trabajo, se acumulan y mantienen con el ejercicio en el área, que necesita tener una actividad que permita el ejercicio y desarrollo de estas capacidades.

En este momento de crecimiento de la energía solar en Chile, hay una base de capacidades que lleva años formándose en las universidades; las tesis realizadas en la UTFSM son un ejemplo de ello¹⁶. A esto habría que sumar los esfuerzos de otras universidades del país, especialmente aquellas con tradición en el área, como la Universidad Católica de Antofagasta, la Universidad de Chile, la Universidad de Concepción y la Universidad de Santiago. Se han desarrollado capacidades, tanto en ciencia y tecnología, para comprender el comportamiento del Sol (medir, registrar, modelar)¹⁷, como en las tecnologías para cosechar su energía. La variedad de trabajos realizados en Chile despliega las posibilidades del área y

¹⁶ Roth, Sarmiento e Ibarra, «Tecnologías de transformación...».

¹⁷ Mauricio Osses, Miriam Roth y Roberto Rondanelli, «Datos solarimétricos, mediciones y registros», en este volumen.

puede ser una guía de entrada al tema para las nuevas generaciones de especialistas solares.

También se han desarrollado capacidades en tecnologías solares socialmente apropiadas (TSA)¹⁸. Estas tecnologías se caracterizan por su simplicidad tecnológica, que es parte de su definición; no obstante, la innovación que involucran es compleja y se han logrado aprendizajes valiosos en cuanto a la apropiación en un entorno cultural particular. Las TSA presentan desafíos interdisciplinarios, en los que diversos actores necesitan relacionarse para solucionar un problema, una necesidad social. Esta área tiene una tradición en Chile, y su propio desarrollo en paralelo a las líneas enraizadas en la academia o la industria. Algunos miembros de la comunidad solar, por ejemplo Pedro Serrano¹⁹, se han desplazado entre instituciones académicas y organizaciones dedicadas a la TSA, produciendo un vínculo entre ambas tradiciones.

En Chile se ha incursionado en múltiples proyectos²⁰, en tanto la formación profesional permite abordar el desafío y da una base para relacionarse con la red de pares en el mundo. Quizás, uno de los factores que aún es preciso fortalecer es el espacio de investigación, desarrollo tecnológico e innovación, y que florezca el mercado de la energía solar para que los investigadores y profesionales puedan ejercer y acumular capacidades. La historia muestra que el rol del Estado en el fomento a las tecnologías emergentes ha sido decisivo en los grandes cambios tecnológicos, como inversor directo, pero también como generador de demanda y creador de un mercado inicial²¹.

Las capacidades se desarrollan con dirección, en tanto siempre hay más de un camino posible, y las áreas de especialidad se van fortaleciendo de acuerdo con el acceso al financiamiento y a los incentivos asociados. Las decisiones sobre dónde invertir en

¹⁸ Román e Ibarra, «El desarrollo de la...».

¹⁹ Entrevista a Pedro Serrano, realizada por Mauricio Osses y Cecilia Ibarra en junio de 2019.

²⁰ Roth, Sarmiento e Ibarra, «Tecnologías de transformación...».

²¹ Mariana Mazzucato, *The Entrepreneurial State. Debunking Public vs Private Sector Myths* (London: Anthem Press, 2013).

aprendizaje también se ven guiadas por las visiones de futuro para la energía solar. Este libro incluye propuestas de futuro²² que, esperamos, logren motivar el aprendizaje y la acción. Hay espacio para distintas visiones: el Sol es abundante y da para pensar en múltiples escenarios, muchos de los cuales pueden ser complementarios. Chile puede convertirse en exportador de energía solar y también se pueden desarrollar proyectos con TSA para que las comunidades y los ciudadanos logren independencia energética y disminuyan su vulnerabilidad.

Como se ha destacado en todos los capítulos, Chile tiene un enorme potencial para cosechar energía solar. Talento tampoco ha faltado. Quizás, lo que falta es que el Sol capture la imaginación del futuro que deseamos y se contagie la visión de un futuro solar donde la abundancia cubra todas, o la mayoría, de nuestras necesidades energéticas.

²² Rodrigo Barraza, Rodrigo Palma, Samir Kouro y Ana María Ruz., «Desafíos y oportunidades de la energía solar en el Chile actual», en este volumen.





Este libro se terminó de imprimir
en Santiago de Chile,
octubre de 2019

Teléfono: 22 22 38 100 / ril@rileditores.com

Se utilizó tecnología de última generación que reduce el impacto medioambiental, pues ocupa estrictamente el papel necesario para su producción, y se aplicaron altos estándares para la gestión y reciclaje de desechos en toda la cadena de producción.



OTROS TÍTULOS PUBLICADOS POR ESTE SELLO

*Energía solar en arquitectura y
construcción*

Pedro Sarmiento

*Ingeniería de la confiabilidad: teoría
y aplicación en proyectos de capital
y en la operación de instalaciones
industriales a través del enfoque*

R-MES

Adolfo Arata • Alessio Arata

*Vísperas del urbanismo en
Latinoamérica, 1870-1930:
imaginarios, pioneros y disciplinas*
Arturo Almandoz • Macarena Ibarra

*Urbanismo y transporte público:
miradas al siglo XX*
Simón Castillo • Marcelo Mardones
Waldo Vila

Visita nuestro catálogo online
www.rileeditores.com

La energía solar en Chile parece ser una novedad del siglo XXI. Sin embargo, tenemos variadas experiencias previas que conectan esa relevancia actual con un pasado solar, interesante y muchas veces sorprendente. Iniciativas como la desalación de agua en el siglo XIX, la obtención de registros solares desde 1920, la creación de un archivo solarimétrico a mediados del siglo XX, así como el diseño e implementación de tecnologías solares, desde los sesenta en adelante nos confirman que existe una historia solar en Chile, que vale la pena recuperar. En ocasiones, da la impresión que el desarrollo de la energía solar fuera intermitente, pero a pesar de esa apariencia de discontinuidad, hay una continuidad que ha estado presente desde sus inicios: la estructura de un trabajo en equipo, de distintas generaciones de ingenieros y técnicos que se han conectado, de un modo u otro, a través de la energía solar. Este libro se construyó bajo esa misma premisa, de conectar y vincular a distintos actores de la energía solar en Chile, y crear a través de estas páginas un espacio de articulación de iniciativas, temporalidades, especialidades y protagonismos. Al concentrarnos en el pasado, buscamos también llegar a aquellos que en algún futuro integrarán estas historias solares.

Proyecto apoyado por

CORFO



ISBN 978-956-01-0747-3

