

XVI Congreso Ibérico y
XII Congreso Iberoamericano
de Energía Solar
Madrid, España, 20-22 junio 2018
©Asociación Española de Energía Solar

METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL DE INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS SOLARES TÉRMICAS PARA APLICACIONES INDUSTRIALES EN CHILE

Castillo, P.A.*, Correa, C.A.***, Ibarra, M.***

*Centro de Tecnologías de Energía Solar, Fraunhofer Chile Research (FCRCSET) Centro de Innovación UC Anacleto Angelini, Piso 8, Vicuña Mackenna 4860, Macul, Santiago, 7820436, Región Metropolitana, Chile, email: mercedes.ibarra@fraunhofer.cl.

**Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas (FCFM) Beauchef 851 Torre Poniente 5to piso, Santiago, 8370456, Región Metropolitana, Chile, email: camila.correa.j@ug.uchile.cl, pablo.castillo.q@ug.uchile.cl

RESUMEN

En el trabajo presentado, se busca identificar y cuantificar el alcance de la integración de energía solar en la industria manufacturera de Chile. En base a datos públicos, se extraen los consumos de combustibles y electricidad anuales de diferentes rubros, y se estima la demanda térmica y de refrigeración efectiva. Contrastando con la disponibilidad geográfica de radiación solar, se han identificado áreas clave en el rubro de los alimentos para una integración de tecnología solar térmica. El potencial ahorro debido al reemplazo de derivados del petróleo en los sub-rubros cárnicos, hortofrutícolas, lácteos y vitivinícolas asciende a 638.629 MWh (USD 26.500 millones), mientras que el reemplazo de electricidad para refrigeración en los sub-rubros panadería, cárnicos, lácteos y vitivinícola se aproxima a 156.199 MWh (USD 18.600 millones).

PALABRAS CLAVE/PALAVRAS CHAVE: Calor solar para procesos industriales, potencial integración de calor solar, evaluación sectores y procesos industriales, Chile

ABSTRACT

The aim of this work is to identify and quantify the effects of solar energy integration in Chile's manufacturing industry. From a public database, annual fuel and electricity consumption of different sectors are extracted, and effective thermal and cooling demand is estimated. Analyzing geographical availability of solar radiation, key areas have been identified in the food industry for possible integration of solar thermal technology. The potential savings due to the replacement of petroleum derivatives in the meat, fruit and vegetable, dairy and wine sub-sectors amounts to 638.629 MWh (USD 26.500 million), while the replacement of electricity for refrigeration in bakery and dairy products, meat and wine sector is estimated in 156,199 MWh (USD 18.600 million).

KEYWORDS: Solar heat for industrial processes, solar heat integration potential, suitable industrial sector and processes, Chile.

INTRODUCCIÓN

Con el creciente interés en integrar energías renovables a la matriz energética chilena, es de gran utilidad conocer el consumo energético de la industria manufacturera nacional, ya que concentra cerca del 24% del consumo del país (Ministerio de Energía, 2015). En Chile, la integración solar representa una oportunidad para desarrollar una mayor independencia económica de las importaciones de combustibles fósiles (Ministerio de Energía, 2015). La participación de energías renovables no convencionales ha llegado a un 18%, principalmente por plantas fotovoltaicas y eólicas para la generación de electricidad (Comisión Nacional de Energía, 2018). Sin embargo, urge explorar alternativas a las fuentes tradicionales de energía térmica ampliamente presentes en las áreas industriales y de transporte. En el informe Balance Nacional de Energía (Ministerio de Energía, 2014) se presenta un desglose del consumo energético según el sector económico y fuente energética. En el sector industrial, el consumo térmico representa sobre 76% del total. Al analizar el consumo eléctrico en este sector, se detecta una participación relevante de equipos de refrigeración.

La integración de calor solar en procesos industriales ha sido estudiada con anterioridad. En 2011, se llevó a cabo una evaluación del potencial de la energía solar térmica en el sector industrial en España (IDAE, 2011). En un estudio similar, se analizó el consumo de calor de la industria en Alemania y determinó los sectores más prometedores para la integración solar (Lauterbach, 2012). En 2016 se realizó un estudio de potencial al estado de California, donde adicionalmente evaluó la instalación de colectores cilindro parabólicos (Kurup, 2016). Por último, el año 2014 se realizó una caracterización de la demanda térmica de la industria chilena (Aiguasol, 2014), pero fue realizada determinando los consumos térmicos de cada industria según el gasto energético en la manufactura de sus productos.

Por ello, el objetivo de este trabajo es identificar y cuantificar el potencial de integración de tecnologías solares térmicas. A diferencia del trabajo presentado por Aiguasol, en este trabajo se determinará el consumo térmico utilizando datos a nivel nacional de la industria manufacturera, analizando la generación de calor y de frío, particularmente en el rango de temperaturas entre 0°C-100°C.

METODOLOGÍA

La metodología presentada en este trabajo identifica y procesa la información presentada en la Encuesta Nacional Industrial Anual (ENIA) realizada en el año 2014 (INE, 2014) para determinar el consumo energético de la industria manufacturera.

Análisis de la Base de Datos

La ENIA recopila diversa información sobre la composición, infraestructura, ubicación geográfica y gastos de las distintas industrias del sector manufacturero de Chile, exceptuando la industria minera. Debido al procedimiento de recopilación de datos, fue necesario seleccionar la información relevante y confiable para el estudio, realizando un filtro de calidad. La ENIA clasifica en cinco niveles de confianza la información entregada, de los cuales se seleccionaron los tres niveles con menor incertidumbre. Esto redujo el espacio muestral de 3333 empresas a 2869 (86%). A continuación, se identificaron dos

fuentes de consumo energético: El consumo de electricidad y el consumo de combustible, los cuales se analizaron de manera independiente.

Consumo de electricidad. La ENIA entrega información sobre la cantidad y costo de electricidad consumida por empresa para un total de 1485 empresas (52% de la muestra). Al contrastar los consumos eléctricos declarados en la ENIA con los presentados en el Balance Nacional de Energía (BNE) (Ministerios de Energía 2014), se encontraron discrepancias tanto de la energía en kWh anuales como en el costo en pesos chilenos (CLP) de más de 8700%. Para normalizar los valores, se utilizó el valor promedio por región de la tarifa BT4 de baja tensión, frecuentemente utilizado en industrias de pequeña y mediana escala, de 74.18 CLP/kWh (CNE, 2015) y se contrastó el costo estimado con el costo declarado de la energía consumida. Se estableció un intervalo de confianza contabilizando las diferencias tarifarias regionales según los contratos particulares de cada empresa y se normalizó según el precio declarado en la ENIA.

Los resultados obtenidos de esta normalización se pueden observar en la Fig. 1. Así, se obtuvo un total de 4.472.180 MWh anuales consumidos con un costo total aproximado de CLP \$ 292.400 MM. Esto representa un 24% del consumo eléctrico presentado en el BNE, conforme con el sector manufacturero. En la Tabla 1 se presentan los valores obtenidos por los principales sectores de la industria. Destacan los valores de consumos eléctricos de los rubros de madera y papel, alimentos y bebidas, y químicos y farmacéuticos. De estos, el sector maderero se vería limitado su accesibilidad al recurso solar debido a su distribución geográfica.

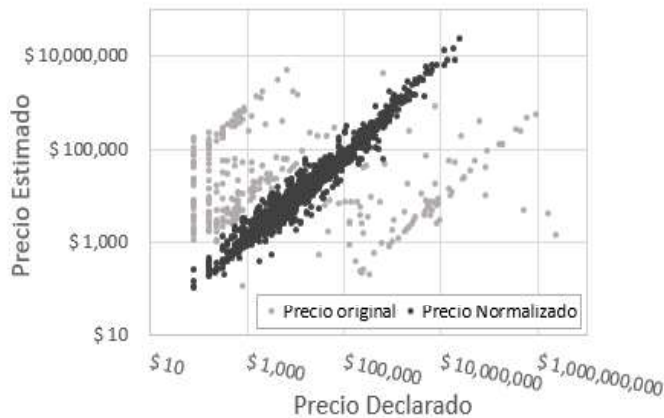


Fig.1. Comparación de precios electricidad estimados y declarados en la ENIA 2014.

Consumo de combustible. Con respecto al consumo de combustible, se identificaron once fuentes: Carbón piedra, coque, petróleo, diésel, bencina, kerosene, gas licuado, gas natural, gas natural licuado, metanol y biomasa (o leña). La ENIA entrega la información sobre la cantidad de cada combustible consumido y su costo asociado. Para comparar los consumos de los distintos combustibles, se determinó la energía consumida equivalente utilizando el poder calorífico inferior (LHV) de cada combustible (ORNL, 2011). Una vez realizada esta conversión, y de manera análoga a los consumos eléctricos, se compararon los valores calculados con los presentados por el Balance Nacional de Energía (Ministerio de Energía, 2014), donde se identificaron discrepancias en el consumo de combustible a nivel nacional de más de 26.000%. Los mayores errores se encontraron en los combustibles derivados del petróleo y del gas natural, por lo que se realizó una comparación entre los gastos declarados

de cada combustible y el gasto esperado asumiendo un valor de \$43 USD/MWh para los derivados del petróleo y \$47 USD/MWh para el gas natural o licuado (ChileAlimentos A.G., 2012). Se normalizó con respecto al valor esperado, logrando disminuir las discrepancias respecto al BNE. De esta forma se obtuvo un consumo de combustible anual de 32.096.655 MWh, con un costo total de CLP \$ 432.488 MM anuales. Esto representa un 57% del consumo de combustible reportado por el BNE. En la Tabla 1 se muestran los valores obtenidos por los principales sectores de la industria. Nuevamente, destaca el sector de madera y papel, alimentos y bebidas, y químicos y farmacéuticos, además de minerales no metálicos.

Tabla 1. Consumo Eléctrico y Combustible Anual Estimado en el Sector Manufacturero Chileno.

Rubro	Consumo eléctrico anual (MWh)	Participación (%)	Consumo combustible anual (MWh)	Participación (%)
Alimentos y Bebidas	1.221.787	23,58%	8.064.017	25,12%
Textiles y Cuero	30.718	0,59%	1.435.316	4,47%
Madera y Papel	1.475.431	28,47%	10.676.017	33,26%
Químicos y Farmacéuticos	913.930	17,64%	2.903.903	9,04%
Caucho y Plástico	325.332	6,28%	940.920	2,93%
Minerales no Metálicos	409.119	7,90%	2.568.950	8,00%
Total	4.376.318	100%	32.096.655	100%

Estimación de demandas térmicas de calor y refrigeración.

A partir de los datos normalizados, se estimó el porcentaje del consumo energético efectivamente destinado a calor de proceso o refrigeración. Para encontrar la demanda efectiva se utilizaron los siguientes supuestos: el uso de equipos de refrigeración tradicional con un COP estándar de 3 (Aiguasol 2014) y una eficiencia de combustión promedio de un 85% (Ganapathy, 2003). El consumo energético estimado se obtuvo mediante una revisión de bibliografía dedicada al rubro, manuales de eficiencia y en base a niveles de exportación e importación. De lo anterior, se extrajo un porcentaje representativo para cada rubro analizado. Según los resultados obtenidos, en promedio un 80-95% de la demanda de combustibles se destina a calor de procesos, mientras que entre un 15-60% de la electricidad se destina a equipos de refrigeración. Se ignoraron usos de combustible no destinados a procesos térmicos, como por ejemplo transporte o iluminación.

CASO DE ESTUDIO: ANÁLISIS DE LA INDUSTRIA DE LOS ALIMENTOS

En el análisis de la base de datos, se identificó la industria de los alimentos como el segundo rubro con mayor consumo energético, por lo que se seleccionó para el caso de estudio. El análisis del rubro forestal se descartó ya se concentra en la zona sur del país, por lo que hay una menor disponibilidad del recurso solar (menores a 1000 kWh/m² anual) y dichas industrias tienen acceso a combustible de biomasa a precio de coste, por lo que las aplicaciones solares no son competitivas.

En contraste, el rubro de los alimentos se concentra en el centro del país, con índices de radiación entre 1600-2100 kWh/m² anual (Molina, 2017). Adicionalmente, la industria de los alimentos concentra el mayor número de industrias en el país, con 957 empresas registradas (INE, 2014). El análisis detallado de la industria de los alimentos permite identificar sub-rubros y procesos que requieren mayores consumos térmicos, y, por tanto, con mayor potencial de uso de energía solar.

El desglose del consumo eléctrico y térmico en la industria de los alimentos y su distribución geográfica a lo largo del país se representa en la Fig. 2. Se puede apreciar que el mayor consumo energético, tanto térmico como de refrigeración se concentra en la zona central del país, en particular en la ciudad de Santiago. Los niveles de radiación son más altos al norte del país, aunque los consumos energéticos de la industria alimentaria son menores.

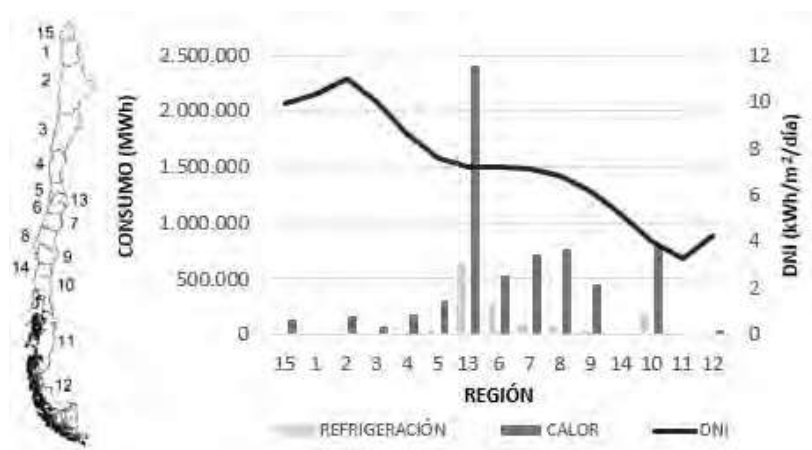


Fig. 2. Distribución geográfica de la demanda estimada de calor y refrigeración de la industria alimentaria y radiación directa normal (DNI).

En la Tabla 2 se presentan los sub-rubros analizados, junto con el porcentaje estimado del consumo de combustible destinado a calor de procesos y de electricidad destinado a refrigeración (Aguasol 2014, IDAE 2011, ChileAlimentos A.G. 2012). En los sub-rubros analizados, la energía destinada a procesos de calor es, en promedio, de un 92%. En cambio, el consumo energético para refrigeración es bastante menor (41%), presentando sub-rubros de mayor interés como: panadería, sector vitivinícola, cárnico y lácteo.

Tabla 2. Porcentajes estimados del consumo de combustibles y electricidad destinados a procesos térmicos para algunos sub-rubros de alimentos y bebidas.

Sub-rubros	Calor de proceso	Refrigeración
Carnes	93%	54%
Pescados	92%	17%
Frutas y hortalizas	92%	16%
Lácteos	95%	41%
Vinos	95%	58%
Panadería	83%	60%

Estos consumos se traducen en gastos económicos, que se muestran en la Fig. 3. Destaca el alto gasto que suponen los consumos energéticos en los sub-rubros de carnes, pescados,

panadería, lácteos y frutas, legumbres y hortalizas, tanto en consumo térmico como de refrigeración.

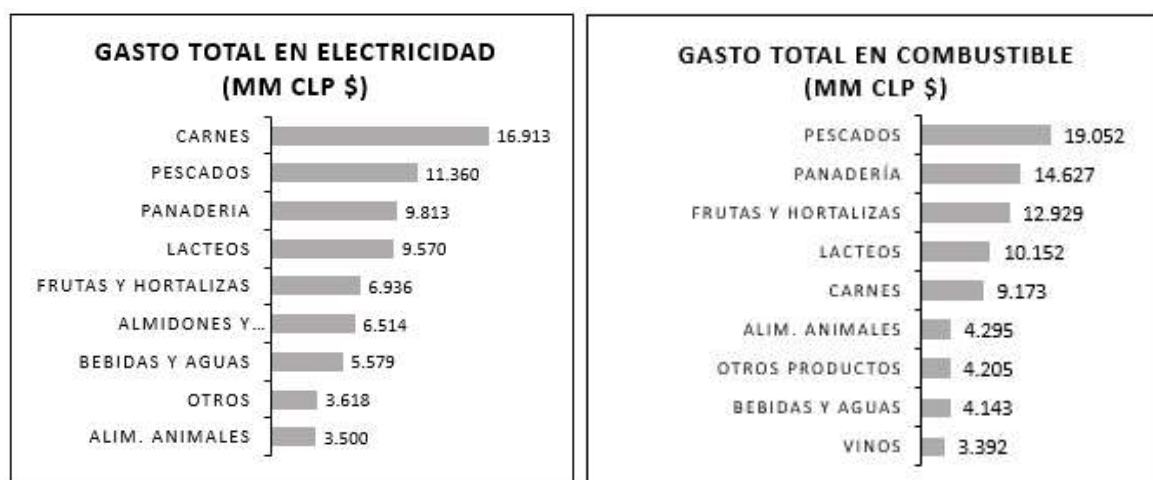


Fig. 3. Gasto económico estimado para electricidad (izquierda) y combustibles (derecha) a nivel nacional.

Análisis de procesos industriales térmicos y de refrigeración

El análisis de los consumos en los sub-rubros alimenticios permitió que se identificaran aquellos con mayor consumo: carnes, pescados, panadería, lácteos, frutas, legumbres y hortalizas. En esto, se realizó un análisis de sus procesos industriales de mayor consumo. Adicionalmente se analizó la industria vitivinícola debido a su importancia en la industria nacional. Se caracterizaron los procesos mediante la determinación de la temperatura de operación, consumo estimado y costos asociados (Borregaard 2009, Brush 2011, CAMCHAL 2016, ChileAlimentos A.G. 2012, IEE 2016). Los procesos se agruparon en categorías según su temperatura de operación, el tipo de operación (proceso de calor o refrigeración) y fracción de consumo respecto al consumo total. En esta aproximación, se consideraron industrias tipo para cada sub-rubro a nivel nacional, permitiendo la identificación de los procesos más interesantes (según su consumo energético y ubicación geográfica) para la integración de energía solar.

Los procesos más atractivos se muestran en la Tabla 3, donde se presentan los resultados de este análisis. Todos los procesos térmicos presentados, a excepción del horneado y secado, operan a temperaturas menores o iguales a 100°C, por lo que se determinó que existe un potencial de 638.629 MWh para integración solar con tecnologías sin concentración como colectores planos o de tubos evacuados (IRENA, 2015). Por otro lado, el único proceso bajo 0°C es el de congelado, lo que permite el uso de sistemas de enfriamiento por absorción de baja potencia para el resto de los procesos de enfriamiento (Dincer, 2016). Por tanto, se estimó un potencial de integración de 156.199 MWh en procesos de refrigeración.

A modo de ejemplo, del gasto total en combustibles del sub-rubro cárnico, un 93% se destina en la generación de calor. De ello, para una empresa típica, un 80% se consume en el proceso de escaldado, lo que se traduce a 354.778 MWh anuales.

Tabla 3. Principales procesos térmicos de cada sub-rubro alimenticio.

Sub-rubro	Proceso	Tipo	Temperatura de Operación (°C)	Fracción de consumo	Consumo Energético (MWh)
Carnes	Escaldado	Calor	60	80%	354.778
Carnes	Almacenamiento	Frío	5	45%	58.815
Pescados	Secado	Calor	160	72%	351.895
Pescados	Congelado	Frío	-18	100%	28.549
Panadería	Horneado	Calor	270	70%	425.299
Panadería	Almacenamiento	Frío	5	100%	71.017
Frutas y hortalizas	Evaporación	Calor	84	32%	107.685
Lácteos	Pasteurización	Calor	72	34%	134.124
Lácteos	Almacenamiento	Frío	4	40%	21.137
Vinos	Lavado	Calor	80	52%	42.042
Vinos	Refrigeración	Frío	3	19%	5.230

CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado una metodología general que busca identificar y cuantificar el potencial de integración de tecnologías solares térmicas en la industria chilena. A partir de datos públicos, se ha determinado el consumo eléctrico y de combustibles de los distintos sectores de la industria manufacturera (a excepción de la industria minera), con los cuales se ha estimado el consumo térmico y de refrigeración de cada sector. El consumo total de combustibles y electricidad de la industria manufacturera es de 32.096.655 MWh y 4.472.180 MWh respectivamente.

Se han identificado cuatro industrias que concentran el consumo energético: madera y papel, alimentos y bebidas, productos químicos y farmacéuticos y minerales no metálicos. Estas industrias concentran el 75.42% del consumo de combustibles (24.297.297 MWh) y el 77.59% del consumo eléctrico (3.469.964 MWh). Según el tipo de industria, el 80-90% del consumo de combustible se utiliza en calor de proceso, y 15-60% del consumo eléctrico se utiliza en equipos de refrigeración.

Debido a su importancia en la industria nacional y a su ubicación en el valle central del país, donde el recurso solar es abundante, se ha seleccionado el sector de los alimentos para un estudio en detalle para la integración de tecnologías solares térmicas. Se han identificado los sub rubros de carnes, pescados, panadería, lácteos, frutas y hortalizas, y vinos, debido a su gran consumo energético e importancia en la producción nacional. De los procesos principales de estos sub-rubros, existe un potencial de integración de 638.629 MWh para procesos de calor a temperaturas menores a 100°C con tecnologías de colectores sin concentración. Para procesos de refrigeración, el potencial de integración alcanza 156.199 MWh para temperaturas sobre 0°C, posibilitando el uso de tecnologías de absorción a pequeña escala alimentadas por calor solar.

REFERENCIAS

- Aiguasol, Corporación de Fomento de la Producción. (2014). *AppSol. Manual de diseño de sistemas solares térmicos para la industria chilena*.
- Borregaard, N., et al., (2009). *Eficiencia Energética y Cambio Climático en el Sector Vitivinícola: Procesos, herramientas y ejemplos de buenas prácticas*.
- Brush, A., Masanet, E., Worrell, E. (2011). *Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for the Dairy Processing Industry, An ENERGY STAR® Guide for Energy and Plant Managers*. Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, Environmental Energy Technologies Division.
- Cámara Chileno Alemana de Comercio e Industria, Agencia Chilena de Eficiencia Energética AChEE, Ministerio del Medio Ambiente Alemán, (2016). *Smart Energy Concepts Chile: Escenario Energético del Sector Agroalimentario*. CAMCHAL.
- Chilealimentos A.G., Asociación Chilena de Eficiencia Energética, (2012). *Manual de Eficiencia Energética en la Industria de los Alimentos Elaborados*. Schwager Energy.
- Comisión Nacional de Energía. (2016). *Anuario Estadístico de Energía 2005-2015*. Ministerio de Energía, Gobierno de Chile
- Comisión Nacional de Energía. (2018). *Reporte mensual ERNC. Volumen N° 20. Abril 2018*. Ministerio de Energía, Gobierno de Chile.
- Dincer, Ibrahim, and Tahir Abdul Hussain Ratlamwala. *Integrated Absorption Refrigeration Systems: Comparative Energy and Exergy Analyses*. Springer, 2016.
- Ganapathy, V. (2003). *Industrial Boilers and Heat Recovery Steam Generators. Design, Applications and Calculations*. Marcel Dekker Inc. Nueva York.
- Instituto para la Diversificación y el Ahorro de Energía, (2011). *Evaluación del potencial de la energía solar térmica en el sector industrial - Estudio térmico PER 2011-2020*. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, Gobierno de España.
- Instituto Nacional de Estadísticas, Ministerio de Economía, Fomento y Turismo, Gobierno de Chile, (2014). *Encuesta Nacional Industrial Anual (ENIA)*.
- Intelligent Energy-Europe (IEE), 2006. *SAHC Project Promotion of Solar Assisted Heating and Cooling in the agrofood sector: D3 Energy and Economic Potential assessment for SAHC plants in selected agrofood sectors*.
- International Renewable Energy Agency. (2015). *Solar Heat for Industrial Processes. Technology Brief*.
- Kurup, P. Turchi, C. Zhu, G. (2016). *Solar process heat potential in California, USA*. Conference Proceeding Eurosun. 11-14 Octubre, Palma de Mallorca, España.
- Lauterbach, C. Schmitt, B. Jordan, U. Vajen, K. (2012) *The potential of solar heat for industrial processes in Germany*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Elsevier.
- Marzo, A. (2016) *Towards the Chilean Solar Thermal Potential Knowledge for Solar Power Tower Plant*. Proceeding Solarpaces. 11-14 Octubre, Abu Dhabi, Emiratos Árabes Unidos.
- Molina, A. Falvey, M. Rondanelli, R., (2017). *A solar radiation database for Chile. Scientific Reports*.
- Ministerio de Energía. (2014). *Consumo Sector Industrial y Minero*. Gobierno de Chile.
- Ministerio de Energía. (2015). *Energía 2050 Política Energética de Chile*. Gobierno de Chile.
- Oak Ridge National Laboratory. (2011). *Biomass Energy Data Book*. ORNL. Departamento de Energía. Gobierno de EE.UU.