



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Máster

Análisis y descomposición sectorial de la energía solar
incorporada en las exportaciones de Chile y el rol de
las políticas energéticas

Autora

Katherine Muñoz Carrasco

Directora

Carmen Fillat-Castejón

Facultad de Economía y Empresa

2019

Resumen

El objetivo de este trabajo es examinar cómo ha evolucionado la energía solar que los sectores utilizan para producir bienes que se exportan en Chile durante los años 2014-2016, y cómo factores que subyacen el crecimiento económico como la intensidad, tecnología y cambios en la demanda han influenciado esta evolución. Además, se evalúan las consecuencias de la política energética “Energía 2050”, la cual incrementa el nivel de energía solar en la matriz eléctrica chilena, examinando el nivel de sustitución energética, mejora en la balanza comercial de combustibles fósiles y emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), y la compatibilidad de esta sustitución energética con el “Plan de Descarbonización de la Matriz Eléctrica” propuesto en 2019.

Los resultados muestran que el incremento en la intensidad de consumo habría sido el principal factor que impulsó el incremento de casi cuatro veces en la energía solar incorporada, siendo clave el sector de la minería del cobre, mientras que la demanda de exportaciones habría contribuido en la dirección opuesta. “Energía 2050” desempeñará un rol clave, generando un incremento de 5,6 veces en el nivel de energía solar incorporada al 2028, permitiendo una disminución importante en las necesidades de importación de combustibles fósiles como el carbón y gas natural, y en las emisiones de GEI. Además, esta sustitución energética jugaría un rol clave en cuanto al cierre de las centrales termoeléctricas contempladas en el “Plan de Descarbonización”.

Abstract

The objective of this paper is to examine how the solar energy that sectors use to produce goods exported in Chile during the years 2014-2016 has evolved, and how factors underlying economic growth such as intensity, technology and changes demand have influenced this evolution. In addition, the consequences of the energy policy “Energy 2050” are evaluated, which increases the level of solar energy in Chile’s electricity matrix, examining the level of energy substitution, changes in the trade balance of fossil fuels and emissions of Greenhouse gases (GHG), and the compatibility of this energy substitution with the “Electric Matrix Decarbonization Plan” proposed in 2019.

The results show that the increase in the intensity of consumption would have been the main factor behind the increase of almost four times in the solar energy incorporated, with the copper mining sector being key, while the demand for exports would have contributed in the

opposite direction. “Energy 2050” will play a key role, generating a 5.6-fold increase in the level of solar energy incorporated in 2028, allowing a significant decrease in the import requirements of fossil fuels such as coal and natural gas, and GHG emissions. In addition, this energy substitution would play a key role in the closure of the thermoelectric plants contemplated in the “Decarbonization Plan”.

Índice

1. Introducción.....	5
2. Metodología.....	9
2.1. Modelo de Leontief.....	9
2.2. Análisis de Descomposición Estructural	11
3. Datos	13
4. Resultados	14
4.1. Energía solar incorporada en las exportaciones de Chile	14
4.2. SDA de la energía solar incorporada en las exportaciones de Chile	18
5. Simulaciones: evaluación del impacto de un aumento del consumo eléctrico por parte del sector de la minería del cobre y un cambio en la matriz eléctrica de Chile .	22
5.1. Efectos de un incremento del consumo eléctrico en el sector de la minería del Cobre.....	23
5.2. Efectos de un cambio en la composición de la matriz eléctrica de Chile	25
5.3. Efecto de un incremento del consumo eléctrico en el sector de la minería del cobre y un cambio en la composición de la matriz eléctrica de Chile.....	27
5.4. Sustitución energética, efecto sobre la balanza comercial y sobre las emisiones de CO ₂ eq	29
5.4.1. Sustitución energética.....	30
5.4.2. Efecto sobre la balanza comercial de carbón y gas natural	31
5.4.3. Efecto sobre las emisiones de CO ₂ eq.....	32
5.5. Compatibilidad con el plan de descarbonización de la matriz eléctrica	33
6. Conclusiones	35
7. Referencias bibliográficas.....	38
8. Anexos	41

1. Introducción

En los últimos años, el tema energético ha mantenido presencia constante en la agenda pública de Chile, existiendo una preocupación creciente respecto de cómo el país va a responder al crecimiento de su demanda energética y de qué manera va a lograr tener energía a precios competitivos, con alta seguridad de suministro y sustentable social y medioambientalmente.

Sabemos que el crecimiento económico de un país está influenciado por cambios en las tecnologías, cambios estructurales y cambios en las demandas finales. El primer objetivo de este estudio es cuantificar la evolución de la energía solar incorporada en los procesos productivos de bienes que se exportan en Chile y examinar cómo los factores intensidad, cambios estructurales y cambios en la demanda han influenciado esta evolución. El análisis se realizará para el periodo 2014-2016. Además, como respuesta a la creciente preocupación por temas ambientales, energéticos y el cambio climático, han surgido en Chile proyecciones y políticas medioambientales de largo plazo, por lo que el segundo objetivo es evaluar las consecuencias de éstas en la matriz eléctrica de Chile, es decir, el nivel de sustitución energética que se generará, así como las mejoras en la balanza comercial, específicamente de combustibles fósiles, y las emisiones de GEI.

Al revisar el escenario actual en Chile, encontramos que la matriz energética primaria está formada en su mayoría por combustibles fósiles, donde la mayor participación corresponde al petróleo (28,7%), seguido por la biomasa (24,8%), carbón (23,7%), gas natural (14,8%) y la energía hidroeléctrica (5,6%), esto según datos de la Comisión Nacional de Energía al año 2017. Se debe destacar que, del total de combustibles fósiles presentes en la matriz primaria, el 91,7% corresponde a importaciones, por lo que se puede decir que Chile es un país altamente dependiente de los mercados externos para la generación de energía, convirtiéndose en un país muy vulnerable a la volatilidad de los precios, lo cual afecta directamente su economía. Sin embargo, a pesar de la alta participación de los combustibles fósiles, al observar la evolución, desde 2014 a 2017, ha disminuido su participación relativa en la matriz energética primaria, mientras que la energía solar y eólica experimentaron importantes alzas en este periodo, a pesar de ser aún muy reducidas dentro del total. En general, desde 2014 a 2017 el consumo de energía primaria total aumento un 3,96%, pasando desde 314.163 Tcal a 326.617 Tcal en el periodo mencionado.

Respecto de la matriz energética secundaria, según la Agencia Internacional de la Energía (AIE), en Chile se ha incrementado el consumo final de energía en un 140,6% desde 1990 a

2017. Particularmente se ha visto un crecimiento en la participación de la electricidad, pasando de un 12% en 1990 a un 22,47% en 2017. Este incremento en el consumo de la electricidad estaría en directa relación con el crecimiento de la economía chilena durante el periodo, a pesar de que la correlación entre estos dos factores ha ido disminuyendo en los últimos años en gran parte gracias a las políticas que fomentan el uso eficiente de la energía, así como también se debe a los incrementos de los precios de la energía que ha incentivado a un uso más racional de ella (la relación entre estos dos factores es más notoria en países menos desarrollados, mientras que las curvas se van desacoplando conforme aumenta el desarrollo).

Respecto de la matriz eléctrica, en Chile la generación es predominantemente térmica a base de carbón (36,86%) y gas natural (16,81%), esto al año 2017, mientras que la principal fuente de energía renovable es la hidroelectricidad (28,72%). Históricamente, en Chile, la generación eléctrica en base a fuentes renovables, principalmente hidroeléctrica, ha tenido una participación importante, con un promedio cercano al 65% en la década de los sesenta, alcanzando el 80% en la década de los ochenta, en los noventa fue de 50%, pasando a un rango de entre 30% y 40% en la última década, dependiendo del año hidrológico. Se debe destacar el incremento que han tenido en los últimos años las energías solar y eólica, pasando desde una participación de sólo 0,55% en 2010 a 9,4% en 2017.

A pesar de la tendencia al alza en cuanto al consumo energético, Chile ostenta un consumo primario de energía per cápita menor que otros países o regiones que cuentan con un mayor nivel de desarrollo económico, por lo que es esperable que aumente su consumo de energía per cápita conforme continúe su desarrollo económico. Sobre esto, surgen los desafíos que presentan los cambios en las tendencias energéticas, sobre cómo se desarrollará la infraestructura energética en cuanto a sus consideraciones ambientales y sociales.

Junto con el incremento del consumo energético, se han visto incrementadas las emisiones de GEI. De acuerdo con la AIE, las emisiones de CO₂ equivalente (CO₂eq) per cápita desde 1990 a 2017 en Chile se duplicaron, pasando desde 2,23 a 4,65 toneladas. Esto es bastante cercano al promedio mundial de 4,37 toneladas de CO₂eq per cápita, pero por debajo del promedio de los países de la OCDE de 8,94 toneladas de CO₂eq per cápita.

En este contexto, la discusión internacional hoy se centra en cómo lograr de modo equilibrado, la mitigación de las emisiones de GEI para limitar el calentamiento global. La AIE estima que para alcanzar una matriz energética que se haga cargo de los desafíos del calentamiento global al 2050, ciertas energías renovables no convencionales (ERNC) deben

aumentar significativamente su participación, además de un aumento significativo de la eficiencia energética. En el caso de Chile, el sector de la energía es el que tiene mayor impacto en cuanto a su participación en las emisiones de GEI, debido principalmente al alto consumo de combustibles fósiles para la generación de electricidad, el transporte terrestre y la minería. Si bien Chile hoy sólo es responsable del 0,25% de las emisiones globales, es altamente vulnerable a los efectos del cambio climático, según Global Climate Risk Index 2017.

Ante este escenario, en 2015 el gobierno de Chile se comprometió, en el marco de su “Contribución Nacional para el Acuerdo Climático de París de 2015”, a reducir las emisiones de CO₂ por unidad de PIB en un 30% al año 2030. Pero, además, se generó la necesidad de contar con una política energética de largo plazo, inserta en la estrategia de desarrollo económico, social e institucional del país. Es así como en el año 2016 se difunde la Política Energética de Chile “Energía 2050”, cuya visión del sector energético al año 2050 es la de un sector energético confiable, inclusivo, competitivo y sostenible, lo cual será alcanzado a través de cuatro pilares, entre los cuales se encuentra “Energía compatible con el medio ambiente”. Este pilar propone como meta una participación creciente de fuentes de energías renovables en la matriz de generación eléctrica de Chile, especialmente ERNC. En este contexto, la Mesa de ERNC de Energía 2050 del Ministerio de Energía, desarrolló en 2016 una evaluación de los impactos tanto técnicos como económicos, derivados de una penetración importante de fuentes renovables (eólico y solar) denominado “Una mirada participativa del rol y los impactos ambientales de las energías renovables en la matriz eléctrica futura”, el cual indica que los sistemas eléctricos chilenos pueden gestionar de forma eficiente un 68% de energías renovables, dentro de lo cual un 42% representaría ERNC. Además, como parte del compromiso del Acuerdo Climático de París 2015, en junio de 2019 el Gobierno de Chile anunció el “Plan de Descarbonización de la matriz eléctrica”, que consiste en cerrar ocho centrales termoeléctricas a base de carbón al año 2024, y el cierre del total de ellas al año 2040, es decir, las 28 centrales que existen actualmente y que representan cerca del 40% de la generación eléctrica en Chile.

En este contexto general, y como parte del segundo objetivo antes descrito, se evaluarán las consecuencias de la política energética “Energía 2050” (Ministerio de Energía, 2015) en la matriz eléctrica de Chile, considerando los resultados del estudio “Una mirada participativa del rol y los impactos de las energías renovables en la matriz eléctrica futura” (Mesa ERNC del Ministerio de Energía, 2016), que indica que los sistemas eléctricos nacionales pueden

gestionar eficientemente un 68% de energías renovables, dentro de lo cual un 42% corresponden a ERNC. De acuerdo a esto, se cuantificará el nivel de sustitución energética que se generará, así como las mejoras en la balanza comercial, específicamente de combustibles fósiles, y en las emisiones de GEI. Se realizará la misma simulación considerando las proyecciones del informe “Proyección del consumo de energía eléctrica en la minería del cobre 2017-2028” (COCHILCO, 2016), que indica que al año 2028, el consumo eléctrico del sector de la minería del cobre aumentará en un 38%. Además, considerando el “Plan de Descarbonización de la Matriz Eléctrica” (Ministerio de Energía, 2019) antes mencionado, se evaluará si esta sustitución energética permite el cierre de las ocho centrales termoeléctricas, es decir, si es posible sustituir energía eléctrica en base a carbón por energía solar, según las metas planteadas.

En este ámbito, el modelo input-output, desarrollado por Wassily Leontief, es la herramienta apropiada para cuantificar el nivel de energía solar utilizada directa e indirectamente por los sectores en la producción de bienes que se exportan en Chile. El enfoque que se seguirá representa una extensión del trabajo de Hummels, Ishii y Yi (2001), quienes utilizan el modelo input-output para medir, a través de relaciones sectoriales, el valor de los insumos importados utilizados directa e indirectamente en la producción de un bien exportado, a lo que llamaron especialización vertical (VS). Al revisar la literatura, trabajos anteriores como el de Leontief y Ford (1972) y el de Miller y Blair (1985) extienden el modelo input-output para examinar temas ambientales, así como también Duchin (1996) en su trabajo “Ecological economics: the second stage” recomienda el modelo input-output como una herramienta para analizar las interrelaciones entre la economía y el entorno físico. Relacionado también a temas ambientales, Duarte, Sánchez-Chóliz y Bielsa (2002) utilizan el enfoque input-output para examinar el uso del agua en la economía española. En el caso de la energía, se pueden encontrar trabajos más recientes como el de López, Accorsi y Sturla (2016) quienes aplican el modelo input-output para realizar un análisis sectorial de la huella de carbono para la economía chilena.

Desde la perspectiva temporal, para cuantificar la evolución en la utilización de energía solar incorporada en los procesos productivos de bienes que se exportan en Chile se utilizará el Análisis de Descomposición Estructural (SDA). Esta técnica se ha utilizado ampliamente en la literatura para examinar la evolución de variables económicas y la influencia de factores como la tecnología, la intensidad y la demanda. Cazcarro, Duarte y Sánchez-Chóliz (2013) realizan un análisis de descomposición estructural para estudiar el crecimiento y la evolución

del consumo de agua en España. Otros autores como Duran, Aravena y Aguilar (2015), Román-Collado, Ordoñez y Mundaca (2018), han realizado análisis de descomposición estructural para estudiar el consumo de energía en la industria chilena.

Según mi conocimiento, este es el primer intento de examinar la evolución de la utilización sectorial de la energía solar incorporada en los procesos productivos de bienes que se exportan en Chile, considerando la contribución de factores como intensidad, tecnología y demanda. Además de simular el efecto que tendrán sobre la matriz eléctrica en el largo plazo la política energética “Energía 2050” e informes que incrementan el nivel de energía solar y que son parte de la discusión actual en el país.

Este documento se ha estructurado de la siguiente manera: la sección 2 describe aspectos metodológicos respecto del Modelo de Leontief y el SDA; la sección 3 describe los principales datos utilizados; la sección 4 presenta los resultados; en la sección 5 se realizan tres simulaciones y se examina la compatibilidad con el plan de descarbonización, y finalmente en la sección 6 se revisan las principales conclusiones del trabajo.

2. Metodología

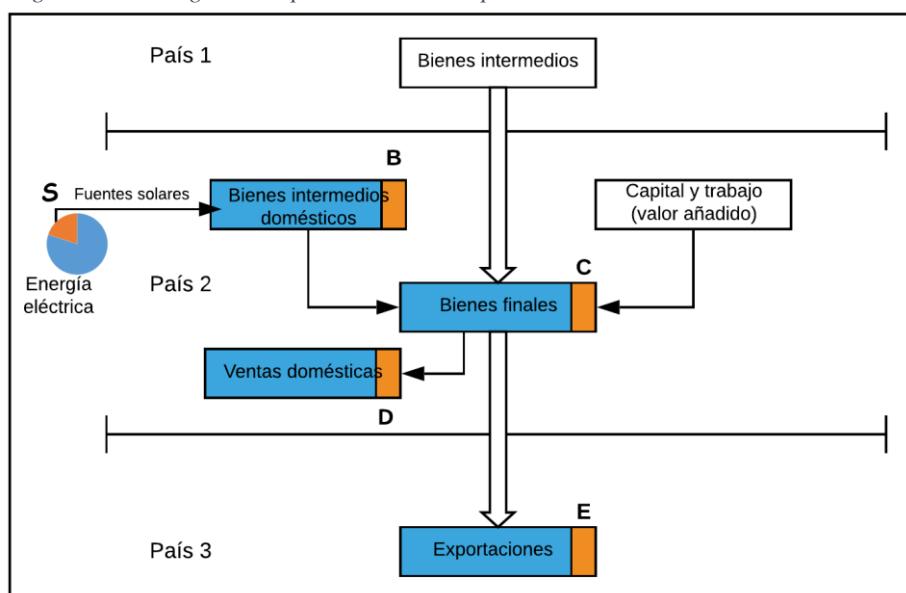
2.1. Modelo de Leontief

Este estudio tiene como primer objetivo cuantificar el nivel de energía eléctrica a partir de fuentes solares incorporada en los procesos productivos de bienes que se exportan en Chile. Para esto, la base del análisis será la utilización de tablas input-output de la economía chilena o Matriz de Insumo Producto (MIP), las cuales incluyen datos a nivel sectorial sobre entradas, valor añadido, producción bruta y exportaciones. En este caso, las MIP están divididas en 111 sectores, entre los cuales se encuentra el sector “Generación de electricidad”, sector que resulta ser clave para este análisis. Dado el gran incremento que ha tenido la producción de electricidad a partir de fuentes solares en Chile en los últimos años, el estudio se realizará para los años 2014 y 2016, siendo la MIP del año 2016 la más reciente que se ha publicado.

Existe bastante literatura que utiliza los modelos input-output para examinar temas de este tipo. En este caso, el enfoque del análisis se basará en una extensión del trabajo realizado por Hummels, Ishii y Yi (2001), quienes a través de las relaciones sectoriales contenidas en las tablas input-output, calcularon el valor de los insumos importados utilizados directa e

indirectamente en la producción de un bien exportado, a lo que llamaron especialización vertical (VS). En este caso, el enfoque será cuantificar la energía solar utilizada directa e indirectamente en la producción de bienes que se exportan en Chile. La figura 2.1 ilustra un ejemplo de este enfoque. El país 2 (Chile) utiliza energía eléctrica a partir de fuentes solares (S) para producir bienes intermedios domésticos (B), los cuales son combinados con capital y trabajo, y con bienes intermedios importados desde el país 1, para generar bienes finales (C). Finalmente, el país 2 exporta parte del bien final al país 3 (E), y la otra parte corresponde a ventas domésticas (D). Así, lo que se pretende cuantificar es la cantidad de S presente en E, es decir, la energía eléctrica a partir de fuentes solares utilizada directa e indirectamente en la producción de bienes finales que se exportan en Chile.

Figura 2.1: Energía solar presente en las exportaciones



Fuente: Elaboración propia

Para implementar esta medida y capturar estos efectos directos e indirectos para cada sector se partirá desde el modelo lineal propuesto por Leontief (1941), y descrito también por Muñoz, C., (1994), cuya expresión general es:

$$X = AX + Y$$

Donde X es un vector columna que contiene la producción total de cada sector, Y es un vector columna que contabiliza la demanda final de cada sector y A es la matriz de coeficientes técnicos de producción. Para efectos de este análisis, se utilizará sólo la demanda final de exportación de cada sector \hat{Y}^{exp} , cuyos valores de este vector se representarán como una matriz diagonal. Luego, al despejar X, se obtiene la siguiente expresión:

$$X = (I - A)^{-1} \hat{Y}^{exp}$$

Donde el término $(I - A)^{-1}$ corresponde a la matriz inversa de Leontief, la cual permite capturar los efectos directos e indirectos, es decir, permitirá capturar la utilización de energía eléctrica proveniente de fuentes solares en todas las etapas de producción de un bien (1^{ra} , 2^{da} , 3^{ra} , 4^{ta} , etc) antes de que estos se conviertan en bienes finales que se exportan. Finalmente, se añadirá a esta expresión un vector de intensidad de energía eléctrica proveniente de fuentes solares $\hat{w} = d_j/x_j$, representado en forma de matriz diagonal, donde d_j es un vector de consumo sectorial de energía eléctrica a partir de fuentes solares y x_j es la producción total sectorial a precios básicos. Así, la medida que permitirá cuantificar la cantidad de energía solar (S) presente en los bienes exportados desde Chile (E) por cada sector, ejemplificada en la figura 2.1 es la siguiente:

$$H = \hat{w} (I - A)^{-1} \hat{Y}^{exp}$$

2.2. Análisis de Descomposición Estructural

El análisis antes descrito, se realizará para dos años, 2014 y 2016, por lo que estamos interesados en analizar la evolución entre estos años de la energía eléctrica proveniente de fuentes solares incorporada directa e indirectamente en la producción de bienes que se exportan y la causa de esta evolución. El enfoque que se seguirá en este estudio será el SDA, el cual permite descomponer los cambios en la matriz H. Esta técnica fue definida por Rose y Chen (1991), tratándose de un análisis de estática comparativa que permite, en términos generales, dividir la tendencia temporal de una variable en un grupo de fuerzas impulsoras que pueden actuar como aceleradoras o retardantes, es decir, permite describir los cambios en una variable a lo largo del tiempo e identificar los factores impulsores de estos cambios.

Tal como indica Cazcarro, Duarte y Sánchez-Chóliz (2013), al realizar el SDA con n factores explicativos, es posible encontrar $n!$ formas distintas exactas de descomposición, por lo que, al ser soluciones exactas, no se generan residuos. Se debe mencionar que en este estudio tenemos 3 factores explicativos, por lo que se pueden generar $3!=6$ formas distintas exactas de descomposición. Sin embargo, tal como lo sugieren Mukhopadhyay, K. y Forssell, O. (2005), Román-Collado, Ordoñez y Mundaca (2018), Muñoz, J. y Hubacek, K. (2008), entre otros, en la práctica se utiliza como una posible solución, el promedio de todas las posibles descomposiciones, lo cual será la elección para este análisis. Más específicamente, la solución final vendrá dada por el promedio de las dos soluciones polares, así, siguiendo este procedimiento, para obtener las soluciones hemos descompuesto por dos períodos de tiempo 0 (2014) y 1 (2016):

$$H_0 = \hat{w}_0 L_0 Y_0^{exp}$$

$$H_1 = \hat{w}_1 L_1 Y_1^{exp}$$

Donde L corresponde a la matriz inversa de Leontief antes definida como $(I - A)^{-1}$. Así, la diferencia entre ambos periodos se puede expresar como:

$$\Delta H = H_1 - H_0 = \hat{w}_1 L_1 Y_1^{exp} - \hat{w}_0 L_0 Y_0^{exp}$$

A partir de esto, la primera descomposición polar vendrá dada por:

$$\Delta H_1 = \Delta \hat{w} L_1 Y_1^{exp} + \hat{w}_0 \Delta L Y_1^{exp} + \hat{w}_0 L_0 \Delta \hat{Y}^{exp}$$

Luego, la segunda descomposición polar vendrá dada por:

$$\Delta H_2 = \Delta \hat{w} L_0 Y_0^{exp} + \hat{w}_1 \Delta L Y_0^{exp} + \hat{w}_1 L_1 \Delta \hat{Y}^{exp}$$

Estás corresponden a las descomposiciones polares con pesos opuestos respecto del tiempo, es decir, las variables del año base (0) frente al año final (1), asociadas a cada uno de los factores de cambio correspondiente. Luego, la solución promedio según la metodología SDA será:

$$\begin{aligned} \Delta H &= \frac{1}{2} [\Delta \hat{w} L_1 Y_1^{exp} + \Delta \hat{w} L_0 Y_0^{exp}] \\ &\quad + \frac{1}{2} [\hat{w}_0 \Delta L Y_1^{exp} + \hat{w}_1 \Delta L Y_0^{exp}] \\ &\quad + \frac{1}{2} [\hat{w}_0 L_0 \Delta \hat{Y}^{exp} + \hat{w}_1 L_1 \Delta \hat{Y}^{exp}] \\ &= I + T + D \end{aligned}$$

Donde, el primer término de la suma corresponde al “efecto intensidad” (I), el cual muestra la contribución de los cambios en la intensidad de consumo de energía eléctrica a partir de fuentes solares por parte de los sectores en Chile (cambios en la matriz eléctrica) al cambio en la cantidad de energía eléctrica a partir de fuentes solares incorporada en los procesos productivos bienes que se exportan (ΔH), el segundo término es un “efecto tecnológico” (T), que muestra cómo los cambios en las estructura de la economía han contribuido al cambio en la energía eléctrica a partir de fuentes solares incorporada en los procesos productivos de bienes que se exportan (ΔH), y el tercero es un “efecto de la demanda de exportaciones” (D), que muestra la contribución de los cambios en la demanda final de exportaciones.

3. Datos

Para implementar la metodología descrita en la sección anterior se han utilizado las MIP de la economía chilena, publicadas periódicamente por el Banco Central de Chile. El periodo temporal seleccionado han sido los años 2014 y 2016, esto considerando que, según información de la AIE, 2013 fue el primer año que se comenzó a generar electricidad a partir de fuentes solares, siendo la generación de ese año sólo 8 GWh, lo que se consideró bastante bajo para efectos de este análisis. Sin embargo, a partir de 2013 la generación de electricidad a partir de fuentes solares ha aumentado drásticamente, por lo que en 2014 la cantidad ya era considerable, seleccionando este como el año inicial para el análisis. Luego, la MIP más recientemente publicada corresponde al año 2016, por lo que, por disponibilidad de datos, este ha sido el segundo y último año considerado para el estudio.

Las MIP, obtenidas desde el Banco Central de Chile, contienen información simétrica para 111 sectores de la economía chilena. Para efectos de este análisis, el nivel de agregación ha sido de 21 sectores, siendo estos los siguientes:

Tabla 3.1: Sectores agrupados

Nº	Sector	Nº	Sector	Nº	Sector
1	Agropecuario-silvícola	8	Suministro de gas y agua	15	Intermediación financiera
2	Acuicultura y pesca	9	Gestión de desechos y reciclaje	16	Serv. Inmob. y de vivienda
3	Minería otros	10	Construcción	17	Servicios personales
4	Minería del cobre	11	Comercio	18	Administración pública
5	Industria manufacturera	12	Hoteles y restaurantes	19	Educación
6	Generación de electricidad	13	Transporte	20	Salud
7	Trans. y distrib. de electricidad	14	Servicios de información	21	Servicios empresariales

Fuente: Elaboración propia

Por otra parte, para cuantificar la energía eléctrica a partir de fuentes solares utilizada directa e indirectamente en los procesos productivos de bienes que se exportan, es necesario contar con información sobre el consumo de energía eléctrica proveniente de fuentes solares para cada uno de los 21 sectores. Esta información se obtuvo desde el Balance Nacional de Energía (BNE) publicado anualmente por Comisión Nacional de Energía de Chile. Se utilizó información del BNE de los años 2014 y 2016, sin embargo, una de las limitaciones es que esta información no se encuentra desagregada exactamente en los 21 sectores descritos. Como solución se tomó desde el BNE sólo la información sobre consumo de energía solar para los sectores que se encontraba desagregada. El resto de información que no se encontraba desagregada, se obtuvo según la proporción de consumo desde el sector “Generación de electricidad” de la MIP de cada año. Así, para cada uno de los veintiún

sectores se tienen los siguientes vectores de consumo de energía eléctrica a partir de fuentes solares para cada año del análisis:

Tabla 3.2: Intensidad de consumo de energía eléctrica a partir de fuentes solares por sector (KWh/MM de pesos chilenos)

Nº	Sector	2014	2016	Nº	Sector	2014	2016
1	Agropecuario-silvícola	6,34	24,34	12	Hoteles y restaurantes	19,09	61,43
2	Acuicultura y pesca	48,65	227,61	13	Transporte	12,49	38,25
3	Minería otros (distinto al cobre)	2354,21	8830,98	14	Servicios de información	14,82	64,20
4	Minería del cobre	2259,96	12467,54	15	Intermediación financiera	3,04	13,11
5	Industria manufacturera	425,26	2422,58	16	Serv. Inmob. y de vivienda	1,89	7,52
6	Generación de electricidad	1793,32	6308,81	17	Servicios personales	10,40	43,60
7	Trans. y distrib. de electricidad	18910,14	79951,89	18	Administración pública	4,21	16,33
8	Suministro de gas y agua	360,19	1376,35	19	Educación	3,60	17,34
9	Gestión de desechos y reciclaje	62,42	217,14	20	Salud	9,46	34,34
10	Construcción	10,02	40,17	21	Servicios empresariales	9,46	45,83
11	Comercio	51,12	167,08				

Fuente: Elaboración propia con datos del BNE y MIP del Banco Central de Chile.

4. Resultados

4.1. Energía solar incorporada en las exportaciones de Chile

En esta sección se presentan los resultados respecto de la cantidad de energía eléctrica obtenida a partir de fuentes solares incorporada directa e indirectamente en la producción de bienes que se exportaron en Chile durante los años 2014 y 2016, los cuales se obtuvieron a partir del análisis input-output. En primer lugar, en las columnas (1) a la (5) de la tabla 4.1 se muestra la cantidad de energía eléctrica a partir de fuentes solares utilizada directamente en la producción de bienes intermedios del sector *i*, medida en KWh, los cuales son requeridos directa e indirectamente por todos los demás sectores en sus procesos productivos para finalmente generar los bienes que son exportados por el propio sector *i*, así como por todos los demás sectores. A modo de simplificar, a este enfoque lo llamaremos utilización directa de energía solar.

Por otra parte, las columnas (6) a la (10) de la tabla 4.1 muestran la cantidad de energía eléctrica obtenida a partir de fuentes solares utilizada en la producción de bienes intermedios de todos los sectores, medida en KWh, los cuales son requeridos de forma directa e indirecta en los procesos productivos de los bienes del sector *i*, y que luego son exportados por este sector. A modo de simplificar, a este enfoque lo llamaremos energía solar incorporada o embodied. Para ambos enfoques se incluye en la tabla 4.1 el porcentaje de participación correspondiente a cada sector y el incremento o disminución desde el año 2014 al 2016. Tal como se esperaba, la cifra de incremento total para toda la economía (21 sectores) es la

misma desde ambos enfoques, sin embargo, la participación sectorial es diferente en ambos casos, lo cual indica que los sectores de origen y destino de la energía eléctrica a partir de fuentes solares son muy diferentes, lo cual justifica este doble análisis para la energía solar directamente consumida y la energía solar incorporada o embodied.

En primer lugar, podemos notar que la energía eléctrica a partir de fuentes solares utilizada en los diferentes procesos productivos, de forma directa e indirecta, para generar las exportaciones de todos los sectores aumentó desde 2014 a 2016 en 318.149.168 KWh, lo que representa un incremento de 388% respecto al nivel del año 2014. Esto va en línea con el incremento en el consumo total de todos los sectores de energía eléctrica a partir de fuentes solares, el cual aumentó un 326% durante el periodo. Un resultado importante a destacar es que, tomando en cuenta la energía eléctrica total requerida por la economía, en 2014 por cada unidad exportada de un bien se utilizaba un 0,27% de energía solar, mientras que en 2016 por cada unidad de bien exportado se utilizaba 1,33% de energía solar.

De acuerdo al primer enfoque antes definido, es decir, considerando la utilización directa de energía solar, vemos en las columnas (2) y (4) de la tabla 4.1 que, los principales sectores que utilizan directamente energía eléctrica a partir de fuentes solares en sus procesos productivos, y que luego terminan en las exportaciones de todos los sectores, corresponden al sector de la minería del cobre, transmisión y distribución de electricidad, y la industria manufacturera, abarcando entre estos tres sectores un 89,36% del total para el año 2014 y un 91,36% del total para el año 2016.

Se debe mencionar que la gran participación del sector de la minería del cobre en la utilización directa de energía solar, correspondiente a un 65,36% para el año 2014 y un 65,96% para el 2016, se debe principalmente a la mezcla de tres factores. En primer lugar, su alta participación está directamente relacionada con el gran tamaño de este sector como proporción de la economía chilena, donde, de acuerdo al informe Cuentas Nacionales de Chile de 2017 elaborado por el Banco Central de Chile, el sector de la minería en su conjunto representaba un 8,9% del total del PIB nacional al año 2016. Al desagregar este porcentaje, la minería del cobre aportó un 7,9% del total del PIB nacional el mismo año. En segundo lugar, este sector es el que concentra el mayor porcentaje de exportaciones en Chile, donde, del total de su producción, un 90% fue exportado durante el año 2014 y un 89,39% durante el 2016.

Tabla 4.1. Energía eléctrica a partir de fuentes solares incorporada en la producción de bienes chilenos que se exportaron durante los años 2014 y 2016

Sector	(1) E. solar en las exportaciones 2014 (KWh)	(2) %	(3) E. solar en las exportaciones 2016 (KWh)	(4) %	(5) Incremento periodo (KWh)	(6) E. solar en las exportaciones 2014 (KWh)	(7) %	(8) E. solar en las exportaciones 2016 (KWh)	(9) %	(10) Incremento periodo (KWh)
Agropecuario-silvícola	27.648	0,03%	120.359	0,03%	92.711	755.889	0,92%	4.489.219	1,12%	3.733.330
Acuicultura y pesca	62.962	0,08%	238.558	0,06%	175.596	41.051	0,05%	199.022	0,05%	157.971
Minería otros	4.466.585	5,45%	17.596.106	4,40%	13.129.520	3.913.489	4,77%	15.879.463	3,97%	11.965.973
Minería del cobre	53.590.701	65,36%	263.916.914	65,96%	210.326.212	61.629.695	75,16%	301.454.109	75,34%	239.824.414
Industria manufacturera	8.991.974	10,97%	48.752.070	12,18%	39.760.096	13.304.010	16,23%	67.617.942	16,90%	54.313.932
Generación de electricidad	3.539.920	4,32%	14.383.008	3,59%	10.843.088	53.918	0,07%	321.928	0,08%	268.010
Trans. y distrib. electricidad	10.684.196	13,03%	52.916.790	13,22%	42.232.593	123.432	0,15%	618.736	0,16%	495.303
Suministro de gas y agua	198.546	0,24%	696.928	0,17%	498.382	8.092	0,01%	344.025	0,09%	335.933
Gestión de desechos y reciclaje	6.571	0,01%	27.604	0,01%	21.032	207	0,00%	671	0,00%	464
Construcción	3.349	0,00%	14.114	0,00%	10.765	1.357	0,00%	7.613	0,00%	6.256
Comercio	249.119	0,30%	842.050	0,21%	592.931	953.202	1,16%	4.513.285	1,13%	3.560.083
Hoteles y restaurantes	4.206	0,01%	14.382	0,00%	10.176	7.331	0,01%	35.572	0,01%	28.242
Transporte	76.462	0,09%	204.872	0,05%	128.410	939.284	1,15%	3.158.146	0,79%	2.218.862
Servicios de información	18.488	0,02%	85.289	0,02%	66.801	79.552	0,10%	469.204	0,12%	389.652
Intermediación financiera	4.892	0,01%	23.202	0,01%	18.310	40.661	0,05%	251.910	0,06%	211.249
Serv. Inmob. y de vivienda	1.554	0,00%	6.179	0,00%	4.624	8.378	0,01%	38.715	0,01%	30.337
Servicios personales	68.270	0,08%	299.339	0,07%	231.068	115.874	0,14%	609.266	0,15%	493.392
Administración pública	758	0,00%	3.640	0,00%	2.882	17.568	0,02%	115.262	0,03%	97.694
Educación	334	0,00%	1.868	0,00%	1.535	2.149	0,00%	10.585	0,00%	8.437
Salud	222	0,00%	951	0,00%	729	812	0,00%	4.986	0,00%	4.174
Servicios empresariales	387	0,00%	2.091	0,00%	1.704	1.193	0,00%	6.655	0,00%	5.461
Total	81.997.145	100%	400.146.313	100%	318.149.168	81.997.145	100%	400.146.313	100%	318.149.168

Fuente: Elaboración propia

Nota: Las columnas (1) a la (5) muestran la utilización directa de energía solar por parte de los 21 sectores, mientras que las columnas (6) a la (10) muestran la energía solar incorporada o embodied.

Finalmente, de acuerdo a estadísticas de la Comisión Chilena del Cobre (COCHILCO), este sector es uno de los sectores con mayor consumo de energía eléctrica a nivel nacional, abarcando un 14% del total nacional. Estos tres factores que han sido descritos, tienen directa relación con la alta participación del sector de la minería del cobre en cuanto a la utilización directa de energía solar.

Respecto del sector transmisión y distribución de electricidad, es el segundo sector en cuanto a su participación en la utilización directa de energía solar, con un 13,03% del total en 2014 y 13,22% en 2016, lo cual se debe a que este es el sector con mayor intensidad de consumo eléctrico total y a partir de fuentes solares (vector \hat{w}), abarcando un 71,71% de la intensidad de consumo directa total en 2014 y 71,15% en 2016. Sin embargo, se debe mencionar que, tal como su nombre lo indica, la utilización directa de energía eléctrica, y por ende de energía solar de este sector, se transmite y distribuye a la mayoría de los demás sectores, por lo que el porcentaje de energía solar incorporada en los procesos productivos de este sector es muy bajo. Además, el nivel de exportaciones de este sector es relativamente bajo, con sólo un 0,16% del total de su producción final, por lo que podemos decir que gran parte de la utilización directa de energía solar de este sector, termina siendo incorporada en las exportaciones de los demás sectores.

Respecto del segundo enfoque, es decir, la energía solar incorporada (embodied) por los distintos sectores, vemos en las columnas (7) y (9) de la tabla 4.1, que es el sector de la minería del cobre el que incorpora la mayor cantidad de energía solar en sus exportaciones, esto a través de la utilización directa e indirecta de bienes intermedios provenientes de todos los demás sectores que utilizan a su vez directamente energía solar. Así, el sector de la minería del cobre abarcó un 75,16% del total en el año 2014 y un 75,34% del total en el año 2016. Esto se debe principalmente, además de los tres factores descritos anteriormente, a que el sector de la minería del cobre utiliza gran cantidad de inputs de sectores que a su vez utilizan gran cantidad de energía eléctrica proveniente de fuentes solares en sus diferentes etapas de los procesos productivos, es decir, sectores con un alto porcentaje de utilización directa de energía solar, como por ejemplo la industria manufacturera, donde en 2014 el 16,43% de los inputs utilizados por el sector de la minería del cobre provenían de la industria manufacturera y en 2016 este porcentaje fue de 13,42%, siendo el sector de la industria

manufacturera a su vez el tercero en cuanto a utilización directa de energía solar, con un 10,97% del total en 2014 y un 12,18% del total en 2016 (ver columnas (2) y (4) de la tabla 4.1). Además, el sector de la minería del cobre utiliza gran cantidad de inputs provenientes del mismo sector de la minería del cobre. Donde el porcentaje de utilización en 2014 fue de 17,39% y en 2016 de 17,21%, siendo este sector, tal como vimos anteriormente, el primero en cuanto a utilización directa de energía solar, con un 65,36% del total en 2014 y un 65,96% en 2016.

Además, vemos en las columnas (7) y (9) de la tabla 4.1 que, desde la perspectiva de energía solar incorporada, la participación del sector transmisión y distribución de electricidad abarca sólo un 0,15% del total en 2014 y un 0,16% en 2016, debido a que la mayor parte de la utilización directa de energía solar de este sector (segundo sector en cuanto a utilización directa de energía solar con un 13,03% en 2014 y 13,22% en 2016), es transmitida y distribuida al resto, y por lo tanto incorporada en las etapas productivas de los demás sectores.

Finalmente, el sector con menor participación respecto de la energía solar incorporada es gestión de desechos y reciclaje con un 0,0003% del total en el año 2014 y 0,0002% en el año 2016.

4.2. SDA de la energía solar incorporada en las exportaciones de Chile

Luego de describir los principales sectores que utilizan, de forma directa e indirecta, energía eléctrica a partir de fuentes solares en sus procesos productivos para luego generar los bienes que se exportan en Chile y la evolución de esta durante el periodo 2014-2016, en este apartado se estudian los factores económicos subyacentes de esta evolución, utilizando para esto la metodología SDA descrita en la sección 2.2. La tabla 4.2 muestra el incremento total en la utilización de energía solar incorporada por los sectores, para la producción de bienes finales que luego se exportan en Chile durante el periodo 2014-2016, cuyo monto es equivalente a 318.149.168 KWh, lo que corresponde a un crecimiento de un 388%, distribuido en los 21 sectores de la economía chilena, y la contribución que han tenido a este incremento los tres efectos que hemos definido antes en la sección 2.2: Intensidad (I), Tecnología (T) y Demanda de exportaciones (D).

Tabla 4.2. Análisis de descomposición estructural 2014-2016

Sector	Efecto Intensidad (I)		Efecto tecnológico (T)		Efecto demanda de exportaciones (D)		Total incremento energía solar	
	Valor	%	Valor	%	Valor	%	Valor	%
Agropecuario-silvícola	3.068.993	0,9%	47.925	0,6%	616.412	2,9%	3.733.330	1,2%
Acuicultura y pesca	156.737	0,0%	5.816	0,1%	-4.582	-0,0%	157.971	0,0%
Minería otros	11.361.661	3,4%	-127.904	-1,6%	732.216	3,4%	11.965.973	3,8%
Minería del cobre	255.264.424	76,9%	7.164.378	90,5%	-22.604.388	-104,7%	239.824.414	75,4%
Industria manufacturera	54.080.562	16,3%	575.315	7,3%	-341.945	-1,6%	54.313.932	17,1%
Generación de electricidad	194.734	0,1%	-12.063	-0,2%	85.339	0,4%	268.010	0,1%
Trans. y distrib. de electricidad	432.818	0,1%	-4.178	-0,1%	66.663	0,3%	495.303	0,2%
Suministro de gas y agua	142.374	0,0%	6.605	0,1%	186.953	0,9%	335.933	0,1%
Gestión de desechos y reciclaje	604	0,0%	-31	0,0%	-109	-0,0%	464	0,0%
Construcción	5.497	0,0%	-74	0,0%	832	0,0%	6.256	0,0%
Comercio	3.253.677	1,0%	177.780	2,2%	128.626	0,6%	3.560.083	1,1%
Hoteles y restaurantes	26.505	0,0%	717	0,0%	1.019	0,0%	28.242	0,0%
Transporte	2.815.993	0,8%	34.101	0,4%	-631.233	-2,9%	2.218.862	0,7%
Servicios de información	312.221	0,1%	29.510	0,4%	47.921	0,2%	389.652	0,1%
Intermediación financiera	165.099	0,0%	-2.415	0,0%	48.564	0,2%	211.249	0,1%
Serv. Inmob. y de vivienda	28.927	0,0%	39	0,0%	1.371	0,0%	30.337	0,0%
Servicios personales	430.760	0,1%	11.173	0,1%	51.459	0,2%	493.392	0,2%
Administración pública	72.770	0,0%	4.805	0,1%	20.118	0,1%	97.694	0,0%
Educación	7.577	0,0%	461	0,0%	399	0,0%	8.437	0,0%
Salud	3.279	0,0%	138	0,0%	758	0,0%	4.174	0,0%
Servicios empresariales	4.589	0,0%	129	0,0%	744	0,0%	5.461	0,0%
Total	331.829.802	100,0%	7.912.225	100,0%	-21.592.860	100,0%	318.149.168	100,0%
% del total		104,3%		2,5%		-6,8%		100,0%

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 4.2 podemos ver la importancia del “Efecto Intensidad (I)” al explicar el incremento total de la energía solar incorporada por los 21 sectores en los procesos productivos de bienes que se exportaron en Chile desde el 2014 al 2016. A este efecto se le atribuye una cifra total de incremento de 331.829.802 KWh, lo cual significa que al mantener todo los demás constante, es decir, sin cambios en la estructura de la producción de la economía chilena o en la demanda de exportaciones, el crecimiento en la intensidad de consumo de energía eléctrica a partir de fuentes solares por parte de los 21 sectores habría provocado un 104,3% de incremento en la energía solar incorporada en la producción de bienes que se exportaron, en relación con el crecimiento realmente observado. Esto se justifica principalmente debido a los cambios en la matriz eléctrica de Chile durante el periodo en estudio, donde el uso de energía solar para generar electricidad pasó de 0,27% en 2014 a 1,33% en 2016, mientras que los combustibles fósiles como el carbón y derivados del petróleo disminuyeron su participación pasando de 42,44% en 2014 a 41,79% en 2016, es decir, el consumo de energía eléctrica por parte de los sectores se ha vuelto menos intensivo en combustibles fósiles y más intensivo en energía solar y otras energías renovables no convencionales.

Al ver la contribución de cada uno de los 21 sectores, el efecto intensidad es positivo en todos ellos, siendo más significativo en el sector de la minería del cobre, aportando un 76,9% del efecto intensidad total, seguido por el sector de la Industria manufacturera con una contribución de 16,3% al mismo efecto. Esto va en línea con lo planteado en el “Informe de actualización del consumo energético de la minería del cobre al año 2017” publicado por COCHILCO en 2018, donde se muestra que el consumo eléctrico en el sector de la minería del cobre ha tenido una tendencia al alza con un incremento de un 86% durante el periodo 2001-2017, y de un 6% durante el periodo analizado en este estudio (Ver gráfico 8.1 en ANEXOS). Este mayor consumo eléctrico por parte del sector de la minería del cobre en los últimos años se debe al progresivo aumento en la intensidad de uso de la concentradora de electricidad, la cual ha sido la principal fuerza demandante. Además, de acuerdo al informe técnico “ERNC en minería: la vía solar cada vez más presente”, en este incremento del consumo de energía eléctrica, se ha visto fortalecida la presencia de la generación de energía a partir de fuentes solares, siendo cada vez más las mineras que se abastecen de energía solar, suscribiendo contratos directamente con plantas solares, por ejemplo con la planta Amanecer

Solar CAP de 100 MW en el desierto de Atacama inaugurada en 2014, que es uno de los mayores proyectos solares en Latinoamérica y uno de los más grandes del mundo, además de la planta Solar de Pattern Energy de 122 MW, entre otros.

Respecto del “Efecto Tecnológico (T)”, la cifra de 7.912.225 KWh atribuible a cambios en la estructura de la producción de la economía, significa que, sin cambios en la intensidad de consumo energético a partir de fuentes solares y sin cambios en la demanda de exportaciones, los cambios en la estructura de producción de la economía en Chile (tecnologías) provocaron un aumento de 2,5% en la energía solar total incorporada por los 21 sectores en los productos chilenos que se exportan. Al ver la contribución de cada sector, nuevamente es el sector de la minería del cobre el que más contribuye a este efecto tecnológico con un 90,5% de la contribución total, lo cual se debe a que este sector en 2016 compra más inputs a los demás sectores que en 2014, específicamente desde los sectores generación de electricidad, transmisión y distribución de electricidad y desde el propio sector de la minería el cobre, todos sectores con un alto porcentaje de utilización directa de energía solar, lo que se ve levemente compensado con una disminución de compras de inputs al sector industria manufacturera. Luego, la contribución al efecto tecnológico del resto de los sectores es muy baja e incluso negativa, como es el caso del sector minería otros, cuya contribución es de -1,6%.

Finalmente, respecto del “Efecto Demanda de Exportaciones (D)”, la cifra de -21.592.860 KWh atribuible a cambios en la demanda final de exportaciones, significa que, manteniendo todos los demás efectos constantes, el cambio en la demanda de exportaciones actúa como un inhibidor del efecto final ΔH , generando una disminución de -6,8% en la cantidad de energía solar incorporada por los 21 sectores para producir los bienes chilenos que se exportan. Esto se debe a que el sector más intensivo en energía eléctrica a partir de fuentes solares incorporada tanto en 2014 como en 2016, esto es, el sector de la minería del cobre, vio disminuido el valor de sus exportaciones en este periodo, pasando de exportar 24.452 miles de millones de pesos chilenos (36.495 millones de dólares) en 2014 a exportar 19.529 miles de millones de pesos (29.147 millones de dólares) en 2016. Esta variación se debe principalmente a la contracción del precio promedio del cobre durante el periodo, el cual se redujo en un 22%, pasando de 307,2 centavos de dólar por libra en 2014 a 239,6 centavos de

dólar por libra en 2016 (precio real), de acuerdo a la base de datos de COCHILCO. Así, la contribución negativa de este sector al efecto de demanda de exportaciones es de un -104,7%. La disminución en este efecto se vio compensado por el aumento en el valor de la demanda de exportaciones de sectores como agropecuario-silvícola, cuyo incremento fue de 541 mil millones de pesos (807 millones de dólares) durante el periodo, siendo su contribución al incremento del efecto de demanda de exportaciones de 2,9%.

De acuerdo a estos resultados, vemos que el efecto intensidad ha sido fundamental para explicar el aumento de energía solar incorporada por los 21 sectores para producir los bienes finales que se exportan, donde la cuantía de este efecto ha sido 1,043 veces el efecto total durante el periodo estudiado, es decir, si no hubiese estado acompañado por cambios en la estructura de la economía o en la demanda de exportaciones, el incremento total de energía solar incorporada hubiese sido aún mayor.

5. Simulaciones: evaluación del impacto de un aumento del consumo eléctrico por parte del sector de la minería del cobre y un cambio en la matriz eléctrica de Chile

En esta sección, se realizan tres simulaciones utilizando la metodología de las tablas input-output, evaluando las consecuencias y cuantificando el incremento que estas simulaciones generan en el nivel de energía eléctrica a partir de fuentes solares incorporada por los sectores y que es utilizada en los procesos productivos de bienes finales que se exportan en Chile. Se utiliza como referencia la MIP del año 2016 (última publicación a la fecha).

Luego, utilizando la información resultante de las simulaciones, se mide el nivel de sustitución energética que conlleva este incremento de energía solar incorporada por los sectores y que es utilizada en los procesos productivos de bienes que se exportan, además de medir el impacto que esto genera en el comercio de los combustibles fósiles más utilizados para la generación eléctrica en Chile, como es el carbón y el gas natural, y por tanto la mejora en la balanza comercial, así como también la disminución de emisiones de CO₂eq que esto conlleva.

En la tabla 5.1 vemos los resultados de las tres simulaciones, los cuales se describen a continuación.

5.1. Efectos de un incremento del consumo eléctrico en el sector de la minería del cobre

De acuerdo a información obtenida desde el informe “Proyección del consumo de energía eléctrica en la minería del cobre 2017-2028” elaborado por COCHILCO con datos del año 2016, el consumo eléctrico del sector de la minería del cobre se ubicará en niveles de 29,2 TWh al año 2028, lo cual representa un aumento en el consumo de un 38% respecto del nivel de consumo del año 2016, siendo el promedio anual de crecimiento un 2,7% durante el periodo. De acuerdo a estas proyecciones, considerando el 38% de incremento en el consumo de energía eléctrica total por parte del sector de la minería del cobre y utilizando la MIP del año 2016, se analizaron las consecuencias que este incremento tendría en los niveles de energía eléctrica a partir de fuentes solares incorporada por los sectores en los bienes que se exportan. El cambio se realiza específicamente en la matriz A (Matriz de Coeficientes Técnicos) de la MIP. Se debe mencionar que en este caso no se han realizado cambios en la matriz eléctrica de Chile, es decir, el porcentaje de energía solar que consumen cada uno de los 21 sectores se ha mantenido constante (vector de intensidad de energía solar sin cambios (\hat{W})).

Los resultados se muestran en las columnas (2), (3) y (4) de la tabla 5.1, en los cuales se observa que el nivel de energía eléctrica a partir de fuentes solares incorporada por los sectores en los bienes que se exportan se incrementaría, pasando de 400.146.313 KWh en 2016 a 412.120.274 KWh en el 2028, lo que representa un aumento de un 2,99% (11.973.960 KWh). Al observar los resultados por sector, de acuerdo a lo esperado, es el sector de la minería del cobre el que muestra el mayor incremento, abarcando un 98,83% de todo el cambio.

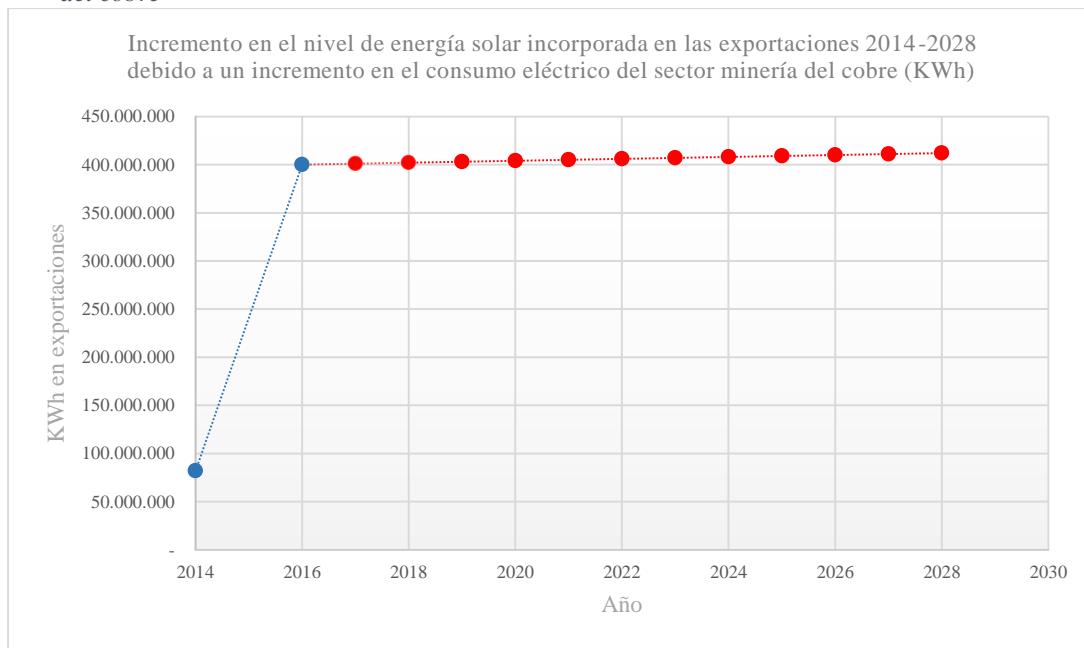
5.1. Resultados de las simulaciones 1,2 y 3: incremento del consumo eléctrico del sector de la minería del cobre y cambio en la matriz eléctrica de Chile

Sector	(1) Esc. base 2016 (KWh en export.)	(2) Simulación 1 (KWh en export.)	(3) ΔKWh	(4) Δ %	(5) Simulación 2 (KWh en export.)	(6) ΔKWh	(7) Δ %	(8) Simulación 3 (KWh en export.)	(9) ΔKWh	(10) Δ %
Agropecuario-silvícola	4.489.219	4.498.143	8.924	0,075%	33.705.723	29.216.503	1,122%	28.921.276	24.432.057	1,086%
Acuicultura y pesca	199.022	199.323	301	0,003%	1.494.289	1.295.267	0,050%	1.281.569	1.082.547	0,048%
Minería otros (dist. al cobre)	15.879.463	15.888.621	9.158	0,076%	119.225.357	103.345.895	3,968%	102.157.522	86.278.059	3,835%
Minería del cobre	301.454.109	313.287.629	11.833.520	98,827%	2.263.362.098	1.961.907.989	75,336%	2.014.315.048	1.712.860.939	76,140%
Industria manufacturera	67.617.942	67.729.897	111.955	0,935%	507.685.524	440.067.582	16,898%	435.476.342	367.858.400	16,352%
Generación de electricidad	321.928	321.968	40	0,000%	2.417.080	2.095.153	0,080%	2.070.125	1.748.198	0,078%
Trans. y distrib. de electricidad	618.736	618.748	12	0,000%	4.645.559	4.026.823	0,155%	3.978.302	3.359.566	0,149%
Suministro de gas y agua	344.025	344.195	170	0,001%	2.582.993	2.238.968	0,086%	2.213.037	1.869.011	0,083%
Gestión de desechos y reciclaje	671	672	1	0,000%	5.038	4.367	0,000%	4.320	3.649	0,000%
Construcción	7.613	7.625	12	0,000%	57.157	49.545	0,002%	49.024	41.411	0,002%
Comercio	4.513.285	4.517.760	4.475	0,037%	33.886.411	29.373.126	1,128%	29.047.404	24.534.120	1,091%
Hoteles y restaurantes	35.572	35.603	30	0,000%	267.080	231.508	0,009%	228.910	193.338	0,009%
Transporte	3.158.146	3.160.843	2.697	0,023%	23.711.829	20.553.682	0,789%	20.322.964	17.164.818	0,763%
Servicios de información	469.204	469.861	657	0,005%	3.522.853	3.053.649	0,117%	3.021.019	2.551.815	0,113%
Intermediación financiera	251.910	252.509	599	0,005%	1.891.375	1.639.465	0,063%	1.623.533	1.371.623	0,061%
Serv. Inmob. y de vivienda	38.715	38.751	36	0,000%	290.677	251.962	0,010%	249.155	210.440	0,009%
Servicios personales	609.266	610.568	1.302	0,011%	4.574.459	3.965.193	0,152%	3.925.712	3.316.446	0,147%
Administración pública	115.262	115.315	53	0,000%	865.405	750.143	0,029%	741.432	626.170	0,028%
Educación	10.585	10.593	7	0,000%	79.477	68.892	0,003%	68.107	57.521	0,003%
Salud	4.986	4.990	4	0,000%	37.437	32.451	0,001%	32.084	27.098	0,001%
Servicios empresariales	6.655	6.661	6	0,000%	49.964	43.309	0,002%	42.826	36.171	0,002%
Total	400.146.313	412.120.274	11.973.960	100%	3.004.357.784	2.604.211.471	100%	2.649.769.709	2.249.623.396	100%
% de incremento		2,99%			650,8%			562,2%		

Fuente: Elaboración propia

Se debe mencionar, que el 2,99% representa el incremento final total, es decir el incremento al año 2028. Luego, para conocer el incremento cada año, se calculó la tasa de crecimiento anual acumulativa, siendo esta de 0,25%, considerando un crecimiento constante cada año, tal como se muestra en el siguiente gráfico 5.1. Cabe mencionar que los puntos azules del gráfico 5.1. representan el incremento real entre 2014 y 2016, mientras que los puntos rojos representan los incrementos acumulados debido a la simulación.

Gráfico 5.1. Simulación 1 Efectos de un incremento del consumo eléctrico en el sector de la minería del cobre



Fuente: Elaboración propia

5.2. Efectos de un cambio en la composición de la matriz eléctrica de Chile

Se analiza por sector y de forma agregada el efecto que tendría una limpieza de la matriz eléctrica de Chile en los niveles de energía solar incorporada en la producción de bienes que se exportan. Este cambio se sustenta en el estudio denominado “Una mirada participativa del rol y los impactos de las energías renovables en la matriz eléctrica futura” elaborado en 2016 por la División de Energías Renovables (Mesa ERNC) del Ministerio de Energía de Chile, a través del cual se evalúan técnica y económicamente escenarios plausibles de penetración de ERNC, como parte del proceso de integración de la política “Energía 2050”. En efecto, el estudio indica que, al año 2029, los sistemas eléctricos nacionales, bajo las condiciones estudiadas, es factible técnica y económicamente que puedan gestionar de forma eficiente un

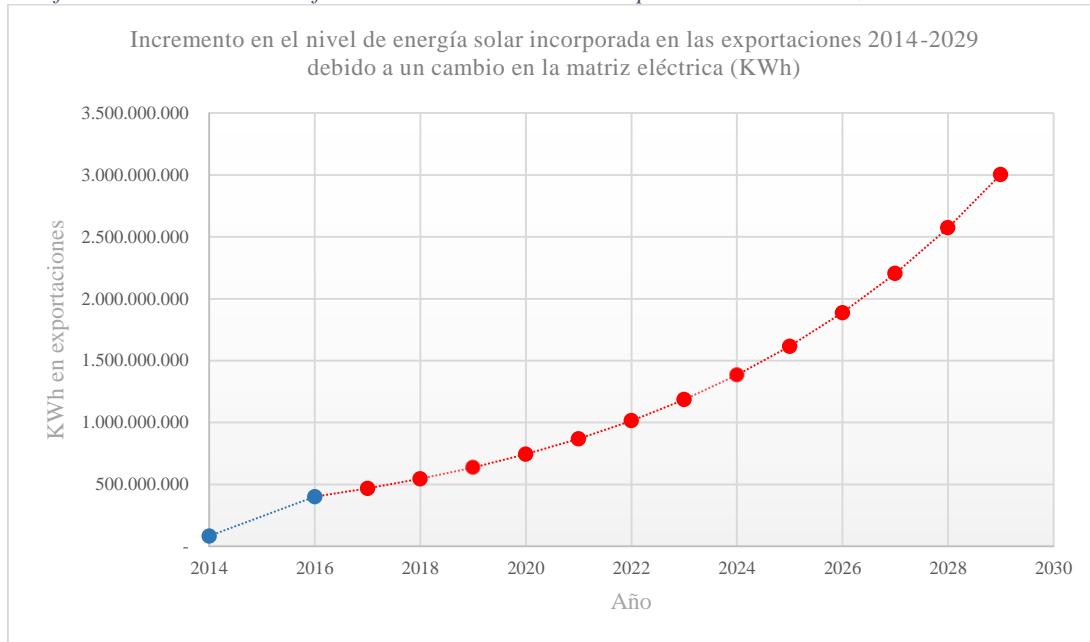
68% de energías renovables en la generación anual, dentro de lo cual, las ERNC representarían un 42%. Más específicamente las fuentes eólica y solar podrían alcanzar niveles en torno al 30% de participación, donde un 20% correspondería a energía eólica y un 10% a energía solar fotovoltaica, todo esto evaluado en un horizonte temporal que va desde el año 2016 al 2029.

De acuerdo a estas proyecciones, se realizó una simulación considerando un incremento de la participación de la energía solar en la matriz eléctrica de Chile desde un 1,33% en el año 2016 a un 10% en el año 2029. Luego, aplicando este incremento al vector de intensidad de consumo de energía eléctrica a partir de fuentes solares (\hat{w}) e implementando la metodología input-output se obtiene que la energía eléctrica a partir de fuentes solares incorporada directa e indirectamente en los procesos productivos de bienes que se exportan se incrementa 6,508 veces, pasando de 400.146.313 KWh en 2016 a 3.004.357.784 KWh en 2029 (incremento de 2.604.211.471 KWh), tal como se muestra en las columnas (5), (6) y (7) de la tabla 5.1.

Luego, al observar los resultados por sector, vemos que el sector de la minería del cobre y la industria manufacturera muestran el mayor incremento, abarcando un 75,33% y 16,89% respectivamente del cambio total, seguidos por el sector minería otros con un 3,97% y el sector comercio con 1,13% del total.

Cabe destacar que el incremento de 650,8% nuevamente corresponde al incremento final total, es decir, el incremento al año 2029. Luego, para conocer el incremento cada año, se ha calculado la tasa de crecimiento acumulativa anual, la cual es de 16,77%, correspondiente a un crecimiento constante cada año, tal como se muestra en el gráfico 5.2. Cabe mencionar que los puntos azules del gráfico 5.2. representan el incremento real entre 2014 y 2016, mientras que los puntos rojos representan los incrementos debido a la simulación.

Gráfico 5.2: Simulación 2 Efectos de un cambio en la composición de la matriz eléctrica de Chile



Fuente: Elaboración propia

5.3. Efecto de un incremento del consumo eléctrico en el sector de la minería del cobre y un cambio en la composición de la matriz eléctrica de Chile

A continuación, se analiza el efecto conjunto de las dos simulaciones vistas anteriormente, es decir, un incremento del consumo eléctrico por parte del sector de la minería del cobre en un 38% y un cambio en la composición de la matriz eléctrica de Chile, considerando un incremento a un 10% en la participación de la energía solar. Cabe mencionar que, debido a que los horizontes temporales de ambas simulaciones son distintos, siendo la simulación 1 al año 2028 y la simulación 2 al año 2029, se calculó el incremento de la simulación 2 que correspondería al 2028, siendo esta de un 8,56% de incremento en la participación de la energía solar en la matriz eléctrica de Chile (y no de un 10%), unificado de esta forma los horizontes temporales, siendo 2028 el horizonte temporal a considerar en esta tercera simulación.

En las columnas (8), (9) y (10) de la tabla 5.1 se muestran los resultados obtenidos, siendo el incremento de energía solar incorporada directa e indirectamente en los procesos productivos de bienes que se exportan al año 2028 de un 562,20%, pasando de 400.146.313 KWh en 2016 a 2.649.769.709 KWh en 2028 (incremento de 2.249.623.396 KWh).

Como era de esperar, en línea con lo ocurrido en las dos simulaciones anteriores, el sector de la minería del cobre y la industria manufacturera muestran el mayor incremento, abarcando un 76,14% y un 16,35% respectivamente del cambio total.

Luego, para conocer el incremento cada año, se calculó la tasa de crecimiento acumulativa anual, resultando ser de un 17,06% anual, considerando un crecimiento constante cada año, tal como se muestra en el gráfico 5.3, donde además se muestran a modo de comparación los resultados de las dos simulaciones anteriores:

Gráfico 5.3: Resultados de las simulaciones 1,2 y 3



Fuente: Elaboración propia

La siguiente tabla 5.2 resume los resultados por año de las tres simulaciones, mostrando los incrementos al año 2028.

Tabla 5.2: Resultados anuales de las tres simulaciones

Año	(1) Simul. 1	(2) Δ Simul. 1	(3) Simul. 2	(4) Δ Simul. 2	(5) Suma Δ Simul. 1 y 2	(6) Simul. 3	(7) Δ Simul. 3
2014	81.997.145		81.997.145			81.997.145	
2016	400.146.313		400.146.313			400.146.313	
2017	401.130.714	984.401	467.269.570	67.123.257	68.107.657	468.419.101	68.272.787
2018	402.117.536	986.822	545.652.537	78.382.967	79.369.789	548.340.561	79.921.460
2019	403.106.787	989.250	637.183.994	91.531.457	92.520.707	641.898.185	93.557.624
2020	404.098.470	991.684	744.069.559	106.885.565	107.877.249	751.418.570	109.520.385
2021	405.092.594	994.123	868.884.833	124.815.274	125.809.398	879.625.275	128.206.705
2022	406.089.163	996.569	1.014.637.468	145.752.635	146.749.204	1.029.706.551	150.081.276
2023	407.088.183	999.021	1.184.839.639	170.202.171	171.201.191	1.205.394.628	175.688.077
2024	408.089.662	1.001.478	1.383.592.676	198.753.037	199.754.515	1.411.058.527	205.663.899
2025	409.093.604	1.003.942	1.615.685.895	232.093.219	233.097.162	1.651.812.709	240.754.183
2026	410.100.016	1.006.412	1.886.712.005	271.026.110	272.032.522	1.933.644.265	281.831.555
2027	411.108.904	1.008.888	2.203.201.874	316.489.868	317.498.756	2.263.561.795	329.917.531
2028	412.120.274	1.011.370	2.572.781.899	369.580.025	370.591.395	2.649.769.709	386.207.914
Total	11.973.960		2.172.635.586		2.184.609.546		2.249.623.396
% Δ	2,99%		542,96%		545,95%		562,20%

Fuente: Elaboración propia

Resulta interesante mencionar que, al sumar los incrementos de la simulación 1 y 2 al año 2028 realizadas separadamente, es decir, los 11.973.960 KWh de la simulación 1 y 2.172.635.586 KWh de la simulación 2 (suma de columnas (2) y (4)), se obtiene un efecto total de 2.184.609.546 KWh como incremento de energía solar incorporada (columna (5)), lo que es igual a un incremento de 545,95%. Sin embargo, al implementar ambas simulaciones al mismo tiempo, tal como se ha hecho en la simulación 3 de este apartado, el incremento total es de 2.249.623.396 KWh (columna (7)), equivalente a un incremento de 562,2%, así, al ocurrir simultáneamente ambos escenarios, es decir, un incremento del consumo por parte del sector de la minería del cobre en un 38% y un cambio en la composición de la matriz eléctrica en Chile, estos se potencian, incrementando más el nivel de energía solar incorporada en las exportaciones que sumando sus efectos por separado, tal como se ve en la tabla 5.2.

5.4. Sustitución energética, efecto sobre la balanza comercial y sobre las emisiones de CO2eq

Considerando los resultados de la simulación 3, se ha calculado el nivel de sustitución energética que conlleva este 562,2% de incremento de energía solar incorporada por los

sectores en los bienes que se exportan (ver columna (7) de la tabla 5.2), así como el impacto que esto genera sobre la balanza comercial de combustibles fósiles, específicamente sobre las importaciones de carbón y gas natural, los cuales juegan un papel importante en la generación eléctrica en Chile, y cuya mayor parte es importada. Finalmente se calcula la disminución en las emisiones de CO₂eq que esta sustitución energética e impacto sobre la balanza comercial conlleva.

5.4.1. Sustitución energética

En la siguiente tabla 5.3 vemos en la primera fila los resultados de la simulación 3, donde debido a los escenarios que hemos planteado se genera un 562,2% de incremento en la energía solar incorporada por los sectores en los procesos productivos de bienes que se exportan al año 2028 (columna (4)), respecto del nivel incorporado en el año 2016. Luego, este incremento se puede traducir en una sustitución de consumo energético, disminuyendo las necesidades de importaciones de combustibles fósiles como carbón y gas natural. Así, considerando el nivel de importaciones de carbón y gas natural de la columna (1), vemos que el incremento de 562,2% de (4) genera una disminución de 3,06% y 4,85% en los requerimientos de importaciones de carbón y gas natural respectivamente, tal como se ve en la columna (5). Cabe mencionar que estos valores se han obtenido considerando sólo la energía solar incorporada en la demanda de bienes que se exportan y no en la demanda total de bienes.

Tabla 5.3: Efectos sobre el nivel de sustitución energética, considerando demanda final exportada

	(1) 2016 (KWh)	(2) 2028 (KWh)	(3) Δ 2016-2028 (KWh)	(4) $\% \Delta$ (2016-2028)	(5) %Sustitución energética
Fuentes solares en exportaciones	400.146.313	2.649.769.709	2.249.623.396	562,20%	
Importaciones Carbón (9.962.211 Ton)	73.525.140.266				3,06%
Importaciones Gas natural (4.269,6 mill m ³)	46.352.597.720				4,85%

Fuente: Elaboración propia. Los datos de las cantidades importadas fueron obtenidos de BNE 2016.

Así, podemos decir que este escenario planteado genera que, por cada unidad exportada de bien al año 2028, las necesidades de importaciones de carbón, en KWh, se reducirán en un 3,06% y las de gas natural en 4,85%.

Se ha realizado el mismo ejercicio, pero considerando el incremento de energía solar incorporada en el total de bienes finales, es decir, considerando la demanda de bienes finales que se consumen a nivel nacional y bienes que se exportan. En la siguiente tabla 5.4 se muestran los resultados.

Tabla 5.4: Efectos sobre el nivel de sustitución energética, considerando demanda final total

	(1) 2016 (KWh)	(2) 2028 (KWh)	(3) Δ 2016-2028 (KWh)	(4) $\% \Delta$ (2016-2028)	(5) %Sustitución energética
Fuentes solares en dda. Final total	1.372.793.011	8.916.779.707	7.543.986.696	549,54%	
Importaciones Carbón	73.525.140.266 (9.962.211 Ton)				10,26%
Importaciones Gas natural	46.352.597.720 (4.269,6 mill m ³)				16,28%

Fuente: Elaboración propia. Los datos de las cantidades importadas fueron obtenidos del BNE 2016.

De acuerdo a estos resultados, podemos decir que el escenario planteado en la simulación 3 genera que, por cada unidad de bien final que se producirá al año 2028, las necesidades de importaciones de carbón, en KWh, se reducirán en 10,26% y las de gas natural en 16,28%.

5.4.2. Efecto sobre la balanza comercial de carbón y gas natural

Para evaluar el efecto sobre la balanza comercial, se han considerado los siguientes datos:

- Poder calorífico del carbón 7.000 kcal/kg y poder calorífico del gas natural 9.341 kcal/m³
- Precio de importación del carbón 128 USD/Ton de carbón y precio de importación del gas natural 3,1 USD/MM BTU de gas natural

Así, se ha obtenido que debido a la sustitución en el consumo de productos energéticos mostrada en la tabla 5.3, se genera una disminución de las necesidades de importaciones de M US\$38.881 de carbón y M US\$23.943 de gas natural, tal como se ve en la segunda fila de la siguiente tabla 5.5. Además, de acuerdo a información del Banco Central de Chile, sabemos que el total de importaciones de carbón y gas natural en el año 2016 fueron de M US\$800.000 y M US\$799.000 respectivamente (primera fila de la tabla 5.5), por lo que se obtiene como porcentaje de ahorro, un 4,86% y 3% en las importaciones de carbón y gas natural respectivamente, lo cual impacta directa y positivamente en la balanza comercial de Chile. Es decir, por cada unidad exportada de bien al año 2028, las necesidades de

importaciones en M US\$, se reducirán en 4,86% por el lado del carbón y en 3% por el lado del gas natural.

Tabla 5.5: Efecto sobre el ahorro de importaciones de carbón y gas natural (M US\$)

	Carbón (M US\$)	Gas Natural (M US\$)
Importaciones 2016	800.000	799.000
Ahorro importaciones	38.881	23.943
% Ahorro	4,86%	3%

Fuente: Elaboración propia

Nuevamente, se realizó el mismo ejercicio, pero considerando el incremento de energía solar incorporada en el total de bienes finales, es decir, considerando la demanda de bienes finales que se consumen a nivel nacional y bienes que se exportan, obteniendo los resultados que se muestran en la tabla 5.6.

Tabla 5.6: efecto sobre el ahorro de importaciones de carbón y gas natural (M US\$)

	Carbón (M US\$)	Gas Natural (M US\$)
Importaciones 2016	800.000	799.000
Ahorro importaciones	130.384,75	80.290,92
% Ahorro	16,30%	10,05%

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a estos resultados, podemos decir que, por cada unidad de bien final que se producirá al año 2028, las necesidades de importaciones de carbón, en M US\$, se reducirán en 16,30%, mientras que las de gas natural se reducirán en 10,05%.

5.4.3. Efecto sobre las emisiones de CO2eq

Finalmente, esta sustitución en el consumo de productos energéticos fósiles, como el carbón y gas natural, a fuentes solares, permitiría disminuir las emisiones de CO2eq. Considerando como factor de emisión del carbón 0.3564 kg CO2eq/KWh y el del gas natural de 0,2016 kg CO2eq/KWh, se ha obtenido como resultado que las emisiones al año 2028 se verían disminuidas en 883.795 ton CO2eq debido al carbón y en 499.925 ton CO2eq debido al gas natural. Luego, considerando el total de emisiones debido al uso de carbón y gas natural en la economía chilena mostradas en la primera fila de tabla 5.7, obtenemos que, por cada unidad

de bien exportado al año 2028, la disminución en las emisiones resulta ser de 2,86% y 5,60% debido al carbón y gas natural respectivamente.

Tabla 5.7: Efecto sobre las emisiones de CO₂eq

	Carbón (Ton CO ₂ eq)	Gas Natural (Ton CO ₂ eq)
Total emisiones	30.942.131	8.932.067
Disminución emisiones	883.795	499.925
% Ahorro	2,86%	5,60%

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, realizando el mismo ejercicio, pero considerando el incremento de energía solar incorporada en el total de bienes finales, es decir, considerando la demanda de bienes finales que se consumen a nivel nacional y bienes que se exportan, se obtiene que, por cada unidad de bien final que se producirá al año 2028, la disminución de las emisiones resulta ser de 9,58% y 18,77% debido al carbón y gas natural respectivamente, tal como se muestra en la siguiente tabla 5.8.

Tabla 5.8: Efecto sobre las emisiones de CO₂eq

	Carbón (Ton CO ₂ eq)	Gas Natural (Ton CO ₂ eq)
Total emisiones	30.942.131	8.932.067
Disminución emisiones	2.963.758	1.676.469
% Ahorro	9,58%	18,77%

Fuente: Elaboración propia

5.5. Compatibilidad con el plan de descarbonización de la matriz eléctrica

Tal como se ha planteado en apartados anteriores, en junio de 2019 el gobierno de Chile anunció el “Plan de Descarbonización de la Matriz Energética”, el cual contempla el cierre de ocho centrales termoeléctricas a base de carbón para el 2024 y el cierre del total de ellas para el 2040. En este apartado se pretende evaluar si con el nivel de sustitución energética que se ha obtenido como resultado en la tabla 5.4, esto es, considerando el incremento de energía solar incorporada en el total de bienes finales (bienes finales que se consumen a nivel nacional y que se exportan) es posible reemplazar la energía eléctrica que se dejará de producir debido al cierre de las ocho centrales termoeléctricas al 2024.

El cronograma para el cierre de operaciones de las ocho centrales termoeléctricas a base de carbón se muestra en la tabla 5.9, donde en la última columna vemos la cantidad de energía eléctrica, medida en KWh, que se dejará de producir debido al cierre de cada una de ellas.

Tabla 5.9: Cronograma cierre de operaciones centrales a carbón 2019-2024

Ciudad	Central	Empresa	Potencia 8 (MW)	Puesta en Servicio	Cierre	KWh por año
Tocopilla	Tocopilla U12	Engie	85	1983	2019	744.600.000
Tocopilla	Tocopilla U13	Engie	86	1985	2019	753.360.000
Iquique	Tarapacá	Enel	158	1999	2020	1.384.080.000
Puchuncaví	Ventanas U1	Aes Gener	114	1964	2022	998.640.000
Coronel	Bocamina U1	Enel	128	1969	2023	1.121.280.000
Puchuncaví	Ventanas U2	Aes Gener	208	1977	2024	1.822.080.000
Tocopilla	Tocopilla U15	Engie	132	1989	2024	1.156.320.000
Tocopilla	Tocopilla U14	Engie	136	1987	2024	1.191.360.000

Fuente: Ministerio de Energía

Luego, de acuerdo a la información de la tabla 5.4, al año 2028, el incremento de energía solar incorporada en la producción del total de bienes finales será de 7.543.986.696 KWh. Para conocer el incremento año a año, se utilizó la tasa de crecimiento acumulativa anual, obteniendo los resultados que se muestran en la tabla 5.10:

Tabla 5.10: Incremento anual energía solar incorporada en el total de bienes finales

Año	Energía solar KWh	Incremento KWh	Incremento acumulado KWh
2014	271.499.212		
2016	1.372.793.011		
2017	1.604.434.435	231.641.424	231.641.424
2018	1.875.162.413	270.727.978	502.369.402
2019	2.191.572.307	316.409.894	818.779.296
2020	2.561.372.361	369.800.054	1.188.579.349
2021	2.993.571.487	432.199.126	1.620.778.476
2022	3.498.698.739	505.127.252	2.125.905.728
2023	4.089.059.813	590.361.074	2.716.266.802
2024	4.779.036.837	689.977.024	3.406.243.826
2025	5.585.438.740	806.401.903	4.212.645.728
2026	6.527.910.744	942.472.005	5.155.117.733
2027	7.629.412.956	1.101.502.212	6.256.619.945
2028	8.916.779.707	1.287.366.751	7.543.986.696
Incremento total		7.543.986.696	

Fuente: Elaboración propia

Vemos que, de acuerdo al plan de descarbonización, al año 2019 se cerrarán dos centrales termoeléctricas, lo cual implica dejar de producir en total 1.497.960.000 KWh ese año, sin

embargo, el incremento acumulado de energía solar incorporada ese año debido a la simulación 3 que se ha planteado, es de sólo 818.779.296 KWh, con lo cual sería posible reemplazar la cantidad de energía eléctrica que se dejará de producir por el cierre de una de las dos centrales contempladas para el 2019. Así, siguiendo el mismo análisis, al año 2024, el incremento acumulado de energía solar incorporada debido a la simulación 3 será de 3.406.243.826 KWh, con lo cual sería posible reemplazar tres de las ocho centrales termoeléctricas cuyo cierre está contemplado para ese año, las cuales serían las centrales “Tocopilla U12”, “Tocopilla U13” y “Tarapacá” cuya producción de energía eléctrica anual suma un total de 2.882.040.000 KWh.

Así, en la primera etapa del proceso de descarbonización que contempla el cierre de ocho centrales termoeléctricas al año 2024, un 31,42% de la energía eléctrica que se dejará de producir podría ser reemplazado por fuentes solares. El restante 68,58% de energía eléctrica que se dejará de producir deberá ser reemplazada por energía proveniente de centrales hidroeléctricas, eólicas u otros tipos de energías renovables.

6. Conclusiones

El objetivo de este estudio ha sido cuantificar la evolución de la energía solar incorporada en los procesos productivos de bienes que se exportan en Chile durante el periodo 2014-2016, así como evaluar las consecuencias de la política energética que se va a implementar “Energía 2050” y que incrementa el nivel de energía solar en la matriz eléctrica, examinando el nivel de sustitución energética que se generará, mejoras en la balanza comercial de combustibles fósiles y las emisiones de GEI, y la compatibilidad de esta sustitución energética con el “Plan de Descarbonización de la Matriz Eléctrica”. Los resultados muestran que la energía solar utilizada en los procesos productivos de los bienes exportados por todos los sectores durante el periodo estudiado se incrementó en 318.149.168 KWh, equivalente a un 388%, un incremento bastante grande que adquiere sus verdaderas dimensiones si lo comparamos con la población chilena. La población de Chile al año 2014 era de 17.758.959 habitantes, por lo que la cifra representa un incremento de 17,915 KWh por habitante durante el periodo 2014-2016, lo cual muestra que, durante el periodo en estudio, la economía chilena ha evolucionado hacia una sociedad con una matriz eléctrica más intensiva en energía solar, a

pesar de que la participación de esta sigue siendo aún baja. El crecimiento en la intensidad de consumo de energía eléctrica a partir de fuentes solares por parte de los sectores en Chile fue el principal factor que impulsó el incremento de energía solar utilizada en los procesos productivos de bienes que se exportan, siendo clave en esto el sector de la minería del cobre, debido a su alto porcentaje respecto del total del PIB en la economía chilena, a su alto nivel de exportaciones, además de ser el sector con mayor consumo de energía eléctrica a nivel nacional, donde se ha visto fortalecida la presencia de las fuentes solares, siendo cada vez más las mineras que se abastecen de energía solar.

La demanda de exportaciones ha contribuido en la dirección opuesta, lo cual ha sido impulsado por la disminución del valor de las exportaciones que ha tenido el sector más intensivo en energía solar incorporada en el periodo 2014-2016, el sector de la minería del cobre, lo cual es debido a su vez a la contracción del precio promedio del cobre durante estos años. Sin reducciones en el valor de las exportaciones de este sector, el nivel de energía solar incorporada en los procesos productivos de bienes que se exportan podría haber aumentado más de 400% durante el periodo.

En este contexto de transición de la matriz eléctrica orientada hacia las ERNC, y más específicamente hacia la energía solar, las políticas energéticas desempeñan un rol clave para garantizar un suministro de energía sostenible y confiable en el futuro. Los resultados de este estudio muestran que, un incremento del consumo eléctrico por parte del sector de la minería del cobre en un 38% y un incremento de la participación de la energía solar en la matriz eléctrica a un 10%, esto según los lineamientos establecidos por la política “Energía 2050” y diversos estudios y proyecciones, generarán al año 2028 un incremento de la energía solar incorporada en los procesos productivos de bienes que se exportan de 2.249.623.396 KWh, equivalente a un incrementos de 562,2% respecto del año 2016. Nuevamente esto adquiere sus verdaderas dimensiones si lo comparamos con la población de Chile, es decir, con los 18.209.069 habitantes al año 2016. Así, la cifra representaría un gran incremento de 123,544 KWh por habitante en el año 2028, resaltando la importancia de las políticas energéticas en el futuro. Respecto de los resultados por sector, la minería del cobre juega un rol importante mostrando la mayor parte de los incrementos. Dado el comportamiento diferenciado de cada sector en cuanto a la intensidad energética y a la utilización de energía solar que incorporan

en los procesos productivos de bienes que exportan, sería aconsejable diseñar políticas energéticas diferenciadas que consideren el comportamiento específico de cada sector, ya que hasta ahora, la política energética chilena resulta ser homogénea para todos los sectores.

Otro resultado interesante es que debido al incremento de 562,2% que se generará al año 2028 respecto del nivel de energía solar que los sectores utilizan en sus procesos productivos para generar sus exportaciones, se generará una disminución de necesidades de importación de combustibles fósiles altamente contaminantes como el carbón y gas natural. Al 2028, por cada unidad exportada de un bien, se requerirá un 3,06% menos de KWh generados con importaciones de carbón o un 4,85% generados con importaciones de gas natural, respecto de la generación e importaciones al año 2016. Sin embargo, al considerar el incremento de energía solar incorporada en el total de bienes finales, estos porcentajes aumentan a un 10,26% para el carbón y un 16,28% para el gas natural. Respecto del valor monetario, esta disminución en las necesidades de importaciones en KWh se traduce en M US\$130.385 de ahorro en importaciones de carbón o M US\$80.291 de ahorro en importaciones de gas natural sólo en el 2028 correspondiente al último año de estudio. Sin embargo, dado que durante el periodo 2016-2028 se ha considerado un incremento gradual, el ahorro durante todo el periodo resultaría ser de M US\$618.377 en el caso del carbón o M US\$380.796 en el caso del gas natural, ahorro que permitiría financiar parte de la transición hacia una mayor participación de energías renovables en la matriz eléctrica de Chile, de acuerdo a los lineamientos establecidos en la Política energética “Energía 2050”, facilitando la implementación de esta.

Finalmente, de acuerdo a la primera etapa del plan de descarbonización de la matriz eléctrica de Chile de 2019, con el nivel de sustitución energética calculado en este estudio, y en línea con lo establecido en la política “Energía 2050”, un 31,42% de la energía eléctrica que se dejará de producir al año 2024 debido al cierre de las 8 centrales termoeléctricas podría ser reemplazada por fuentes solares, el restante 68,58% de energía eléctrica que se dejará de producir deberá ser reemplazada por energía proveniente de centrales hidroeléctricas, eólicas u otros tipos de energías renovables. Así, podemos reconocer que la energía a base de fuentes solares jugará un importante rol en esta transición que se está viviendo en el país hacia una

matriz eléctrica a base de energías limpias y compatible con el medioambiente, siendo la energía solar un importante pilar de la política energética de largo plazo “Energía 2050”.

Respecto de algunas observaciones finales, podemos decir que la metodología utilizada en este análisis, basada en tablas input-output y SDA, se ha aplicado a la energía solar incorporada directa e indirectamente en los procesos productivos de bienes chilenos que se exportan. Sin embargo, esta metodología también puede aplicarse perfectamente a la demanda de productos en general y no sólo a las exportaciones, así como también a otros tipos de energías como la eólica, hidráulica; a recursos naturales como el agua o a contaminantes como el CO₂, por nombrar algunos ejemplos.

7. Referencias bibliográficas

Banco Central de Chile. (2013). Cuentas nacionales de Chile, 2013-2018. [Base de datos]. Recuperado el 04 de abril de 2019 de: https://si3.bcentral.cl/estadisticas/Principal1/Informes/anuarioCCNN/index_anuario_CCN_N_2018.html?chapterIdx=-1&curSubCat=-1

Banco Central de Chile. (2017). Cuentas nacionales de Chile: evolución de la actividad económica tercer trimestre de 2017. Recuperado el 25 de junio de 2019 de: https://www.bcentral.cl/documents/20143/32019/CuentasNacionales_tercer_trimestre2017.pdf/b01f0af1-3285-fcef-e19a-4af0a41c833b

Cámara, A., Flores, M., y Fuentes, P. (2011). Análisis económico y medioambiental del sector eléctrico de España. Estudios de Economía Aplicada, 29(2), 493-514. Recuperado el 6 de junio de 2019 de: <https://www.redalyc.org/pdf/301/30120840004.pdf>

Cazcarro, I., Duarte, R. y Sánchez-Chóliz, J. (2013). Economic growth and the evolution of water consumption in Spain: A structural decomposition analysis. Ecological Economics, 96, 51-61.

Comisión Chilena de Cobre (2017). Proyección del consumo de energía eléctrica en la minería del cobre 2017-2028. Recuperado el 20 de junio de 2019 de: <https://www.cochilco.cl/Mercado%20de%20Metales/Proyec%C3%B3n%20Consumo%20EE%202017-2028%20v2.pdf>

Comisión Chilena del Cobre. (2018). Informe de actualización del consumo energético de la minería del cobre al año 2017. Recuperado el 2 de julio de 2019 de: <https://www.cochilco.cl/Mercado%20de%20Metales/Informe%20de%20Consumo%20de%20Energ%C3%A1tica%20final.pdf>

Comisión Chilena del Cobre. Precio de los Metales [Base de datos]. Recuperado de 25 de junio de 2019 de: <https://www.cochilco.cl/Paginas/Estadisticas/Bases%20de%20Datos/Precio-de-los-Metales.aspx>

Comisión Nacional de Energía. Balance Nacional de Energía [Base de datos]. Recuperado el 3 de junio de 2019 de: <http://energiaabierta.cl/visualizaciones/balance-de-energia/>

Comisión Nacional de Energía. Precio Carbón Térmico EQ. 7.000 kCal/kg [Base de datos]. Recuperado el 15 de junio de 2019 de: <http://datos.energiaabierta.cl/dataviews/235784/precio-carbon-termico-eq-7000-kcalkg/>

Duarte, R., Sánchez-Chóliz, J. y Bielsa, J. (2002). Water use in the Spanish economy: an input-output approach. Ecological Economics, 43(1), 71-85.

Duchin, F. (1996). Ecological economics: the second stage. Getting down to earth: practical applications of ecological economics, 285-299.

Durán, E., Aravena, C. y Aguilar, R. (2015). Analysis and decomposition of energy consumption in the Chilean industry. Energy Policy, 86, 552-561.

Hummels, D., Ishii, J. y Yi, K. (2001). The nature and growth of vertical specialization in world trade. Journal of International Economics, 54, 75-96.

IndexMundi. Gas natural Precio Mensual - Dólares americanos por millón de BTU [Base de datos]. Recuperado el 17 de junio de 2019 de: <https://www.indexmundi.com/es/precios-de-mercado/?mercancia=gas-natural&meses=120>

International Energy Agency. Statistics. [Base de datos]. Recuperado el 20 de mayo de 2019 de: <https://www.iea.org/statistics/>

Kreft, S., Eckstein, D. y Melchior, I. (2016). Global Climate Risk Index 2017. Recuperado el 5 de julio de 2019 de: <https://germanwatch.org/sites/germanwatch.org/files/publication/16411.pdf>

Leontief, W. (1941). The structure of American economy, 1919-1929: an empirical application of equilibrium analysis. Cambridge, Mass.: Harvard University Press.

Leontief, W. y Ford, D. (1972). Air pollution and the economic structure: empirical results of input-output computations. Input-output techniques: proceedings of the Fifth International Conference on Input-Output Techniques, North-Holland, Amsterdam, pp. 9-23.

López, R., Accorsi, S. y Sturla, G. (2016). Análisis sectorial de la huella de carbón para la economía chilena: un enfoque basado en la matriz insumo-producto. Universidad de Chile, Facultad de Economía y negocios, SDT 431.

Miller, R. y Blair, P. (1985). Input-Output analysis: Foundations and extensions. (2º ed.) New York: Cambridge University Press.

Ministerio de Energía (2015). Energía 2050, Política energética de Chile. (2º ed.). Recuperado el 25 de mayo de 2019 de: <http://www.energia2050.cl/wp-content/uploads/2017/12/Politica-Energetica-Nacional.pdf>

Ministerio de Energía (2015). Una mirada participativa del rol y los impactos de las energías renovables en la matriz eléctrica futura. Recuperado el 30 de mayo de 2019 de: <https://www.4echile.cl/4echile/wp-content/uploads/2017/03/Resumen-Mesa-ERNC.pdf>

Montes, C. y González, A. (2018). Consumo de energía y recursos hídricos en la minería del cobre al 2017. Recuperado el 15 de junio de 2019 de: [https://www.cochilco.cl/Presentaciones/Presentaci%C3%B3n%20informe%20energ%C3%A9tica%20y%20agua%20\(2018\).pdf](https://www.cochilco.cl/Presentaciones/Presentaci%C3%B3n%20informe%20energ%C3%A9tica%20y%20agua%20(2018).pdf)

Mukhopadhyay, K. y Forssell, O. (2005). An empirical investigation of air pollution from fossil fuel combustion and its impact on health in India during 1973-1974 to 1996-1997. Ecological Economics, 55(2), 235-250.

Muñoz, C. (1994). Las cuentas de la nación: introducción a la economía aplicada. (2º ed.). España: Aranzadi S.A.

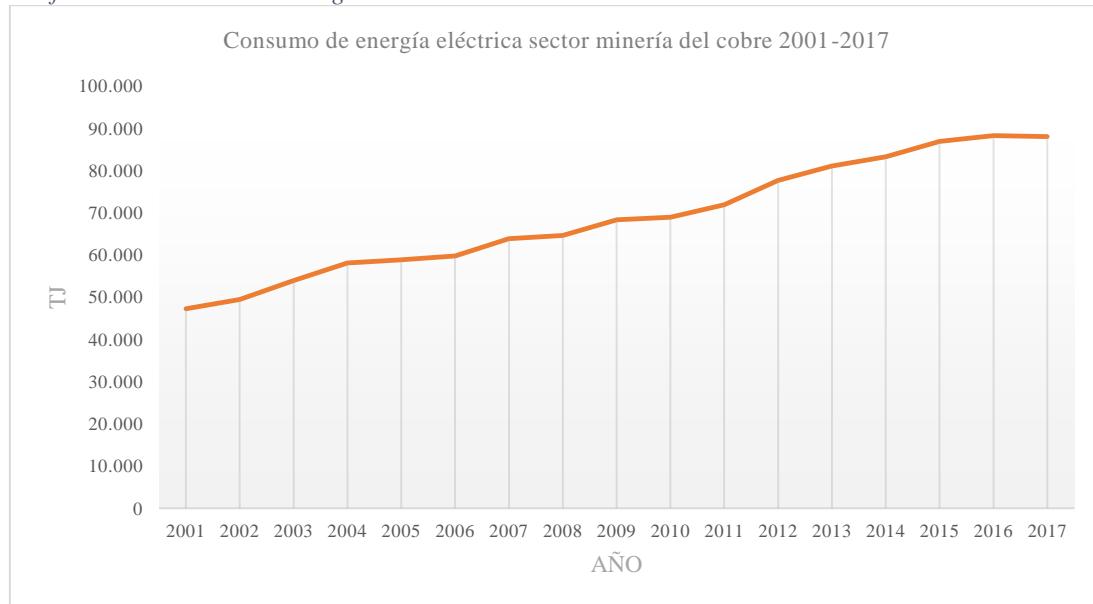
Muñoz, P. y Hubacek, K. (2008). Material implication of Chile's economic growth: Combining material flow accounting (MFA) and structural decomposition analysis (SDA). Ecological Economics, 65(1), 136-144.

Román-Collado, R., Ordoñez, M. y Mundaca, L. (2018). Has electricity turned green or black in Chile? A structural decomposition analysis of energy consumption. Energy, 162, 282-298.

Rose, A. y Chen, C. (1991). Sources of change in energy use in the U.S. economy, 1972-1982: A structural decomposition analysis. Resources and Energy, 13(1), 1-21.

8. Anexos

Gráfico 8.1. Consumo de energía eléctrica en el sector de la minería del cobre 2001-2017



Fuente: Elaboración propia con datos de COCHILCO.