

## ***EFECTO A MEDIANO PLAZO DE FUENTES RENOVABLES EN LA SUSTENTABILIDAD DE LA GENERACIÓN ELÉCTRICA EN CHILE***

### ***MID-TERM EFFECT OF RENEWABLES SOURCES OF ENERGY IN THE SUSTAINABILITY OF ELECTRICITY GENERATION IN CHILE***

*Mabel Vega-Coloma<sup>1\*</sup> y Claudio Zaror Z<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad del Bío-bío, Av. Collao 1202 Casilla 5-C, Concepción, Chile.

<sup>2</sup> Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción, Casilla 160-C, Correo 3, Concepción, Chile.

Recibido: Septiembre 14, 2019; Revisado: Octubre 24, 2019; Aceptado: Noviembre 22, 2019

#### **RESUMEN**

El desierto de Atacama en el norte de Chile posee de las mayores tasas mundiales de radiación solar y alberga gran actividad minera, la cual ha activado importantes inversiones en plantas solares fotovoltaicas (FV) para suplir sus necesidades eléctricas. La introducción masiva de estas centrales tiene el propósito de alcanzar cerca de un 25% de la matriz nacional al año 2050. En este contexto, este trabajo presenta los resultados del efecto de la energía solar en el perfil ambiental, económico y social de la generación eléctrica en Chile considerando un escenario al año 2050, usando el enfoque de ciclo de vida, bajo condiciones de sequía por cambio climático. Los resultados muestran que las centrales FV contribuyen a reducir los impactos en calentamiento global, ecotoxicidad marina y potencial de eutrofización, dependencia a la importación, y toxicidad humana, mientras el costo eléctrico nivelado y costo total de capital presentan variaciones más discretas.

**Palabras Clave:** electricidad; energía solar; evaluación de ciclo de vida.

#### **ABSTRACT**

The Atacama Desert in northern Chile features one of the highest solar radiation levels worldwide, and housing vast mining industries, which had activated the investment in solar photovoltaic (PV) power plants in order to assure their requirements. A massive introduction of solar PV plants in the Atacama region has the purpose to reach around 25% of the national generation capacity by 2050. In this context, this study presents the



Copyright © 2019. Este es un artículo de acceso abierto, lo que permite su uso ilimitado, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada.

\* Autor para la correspondencia: Mabel Vega-Coloma, Email: [mvega@ubiobio.cl](mailto:mvega@ubiobio.cl)



results of the solar energy effect in environmental, economic and social profile of electricity generation in Chile, considering a mid-term scenario, using a life-cycle approach, under drought conditions due to climate change. Results show that solar PV power electricity generation help to reduce global warming potential, marine ecotoxicity, and eutrophication potential, as well as import dependency, human toxicity, while leveled electricity cost and total capital cost present smoother variations.

**Keywords:** electricity; solar energy; life cycle assessment.

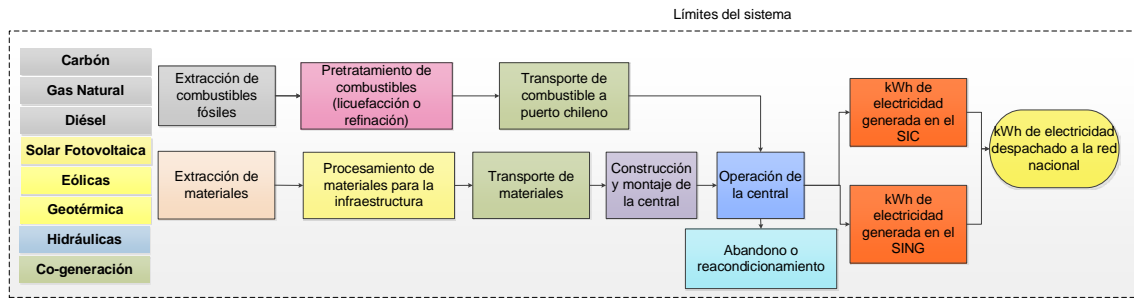
## 1. INTRODUCCIÓN

La sostenida baja en los costos de inversión en energías renovables (IEA, 2015) y la creciente necesidad de reducir el uso de fuentes fósiles para mitigar el calentamiento global han impulsado a países como Chile, que no cuentan con reservas de combustibles propios, a desarrollar inversiones en energías renovables en lugares con altos potenciales de aprovechamiento (específicamente solar FV en el desierto de Atacama). Por su parte, el Ministerio de Energía de Chile ha trabajado en la definición de políticas para el crecimiento del sector, proyectando una primera estimación de los escenarios eléctricos nacionales a mediano plazo que incluyen las necesidades de renovación de la matriz eléctrica (Ministerio de Energía, 2015). No obstante, a la fecha no se han evaluado las implicancias de esta renovación considerando una mirada integradora de las dimensiones ambientales, económicas y sociales. Estudios desarrollados en EEUU, Turquía, Reino Unido y México (Atilgan & Azapagic, 2016); (Stamford & Azapagic, 2012); (Santoyo-Castelazo & Azapagic, 2014) han estimado cuantitativamente, el desempeño ambiental, económico y social de las tecnologías de generación eléctrica, de manera de evidenciar las diferencias entre de éstas y como contribuyen a la matriz eléctrica, sin embargo, no se han reportado estudios aplicados a la realidad chilena. El objetivo de este trabajo es analizar el efecto ambiental, económico y social de un escenario proyectado al año 2050 considerando una alta penetración de fuentes renovables en la matriz eléctrica chilena.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

Debido a la disponibilidad de información primaria se calcularon 19 indicadores de sustentabilidad y se aplicaron a ocho tecnologías de generación eléctrica más representativas en Chile, basados en estadísticas nacionales del sector. Las tecnologías analizadas fueron: centrales a carbón, gas natural, diésel, hidroeléctrica, biomasa, eólica y solar fotovoltaica, siendo estas dos últimas las que más crecen durante el período analizado. Los límites del sistema abarcan de la cuna a la puerta, y la unidad funcional declarada es 1 kWhE generada (ver fig. 1). Los indicadores ambientales se calcularon según el estándar ISO 14.040-44:2006 de evaluación de ciclo de vida, siguiendo el enfoque de la cuna a la puerta y usando el método de impacto CML 2000 versión 2.05 y que consta de diez categorías de impacto. Este método está incorporado en el software *SimaPro 7.3.3*, y que además cuenta con la base de datos de ciclo de vida *Ecoinvent 2.2*. De las diez categorías de impacto, ocho de éstas fueron consideradas como indicadores ambientales: agotamiento de la capa de ozono (ACO), oxidación fotoquímica (OF),

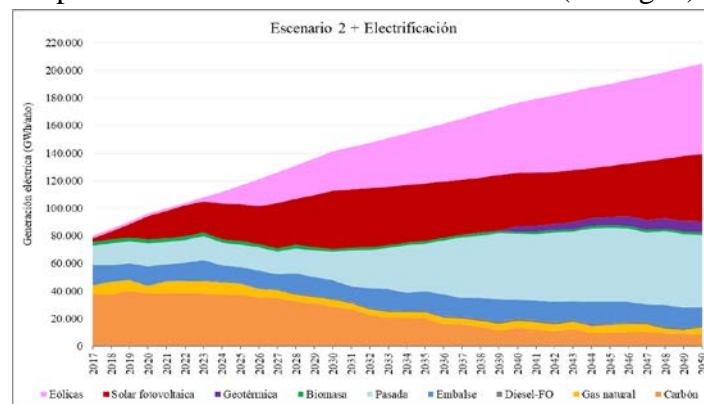
potencial de calentamiento global (PCG), potencial de acidificación (PA), potencial de eutrofización (PEU), ecotoxicidad en agua fresca (ETAF), ecotoxicidad marina (ETM), y ecotoxicidad terrestre (ETT). Las restantes dos como indicadores sociales por su ámbito de incumbencia: agotamiento de recursos abióticos (ARA) y toxicidad humana (TH).



**Figura 1.** Límites del sistema para la evaluación de indicadores ambientales de la generación eléctrica en Chile (Vega-Coloma, 2018)

Debido a la falta de información que cubra el ciclo de vida del proceso productivo de manera sistemática, los aspectos económicos y sociales fueron caracterizados en su mayoría en base a información del proceso directo (etapa de operación). Los indicadores sociales seleccionados y basados en literatura (Stamford & Azapagic, 2012) fueron: dependencia a la importación (DI), importación de combustibles potencialmente evitada (ICPE), diversidad en el suministro de combustibles (DSC), provisión de empleos (PE), índice de corrupción (IC). Por su parte, los indicadores económicos basados en literatura (Santoyo-Castelazo & Azapagic, 2014; Stamford & Azapagic, 2012) fueron: costo total de capital (CTC), costo anualizado total (CAT), costo eléctrico nivelado (CEN), sensibilidad al precio del combustible (SPC).

Los escenarios a futuro fueron estimados por el Ministerio de Energía en el documento Hoja de Ruta 2050 (Ministerio de Energía, 2015). Estos escenarios cumplen con requisitos definidos para el sector al año 2050, como ser alta penetración de fuentes renovables, internalización de externalidades como impuestos a emisiones de CO<sub>2eq</sub> y políticas de electrificación o eficiencia energética. Por lo anterior se selecciona el escenario que implica las mejores condiciones para una alta penetración de las fuentes renovables (E2+Electrificación). En particular, la penetración de la energía solar alcanza un 25% con políticas de electrificación al año 2050 (ver fig. 2).



**Figura 2.** Escenario de generación eléctrica con la mayor penetración de energía solar en Chile al año 2050. Escenario 2 con medidas de electrificación (Ministerio de Energía, 2015)

El perfil ambiental de las tecnologías de generación eléctrica se construyó sobre las fuentes identificadas en trabajos previos reportados por los autores (Vega-Coloma & Zaror, 2018a; Vega-Coloma & Zaror, 2018b). Por su parte, el cálculo de los indicadores económicos de costo total de capital y costo eléctrico nivelado fueron obtenidos desde fuentes abiertas con datos apropiados para la realidad nacional (CNE, 2016). Finalmente, el cálculo del perfil social de la generación eléctrica se usó la información de importación de combustibles, eficiencias de conversión promedio de las tecnologías fósiles, empleos generados directos, índice de percepción de la corrupción (Transparency international, 2015).

### **3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

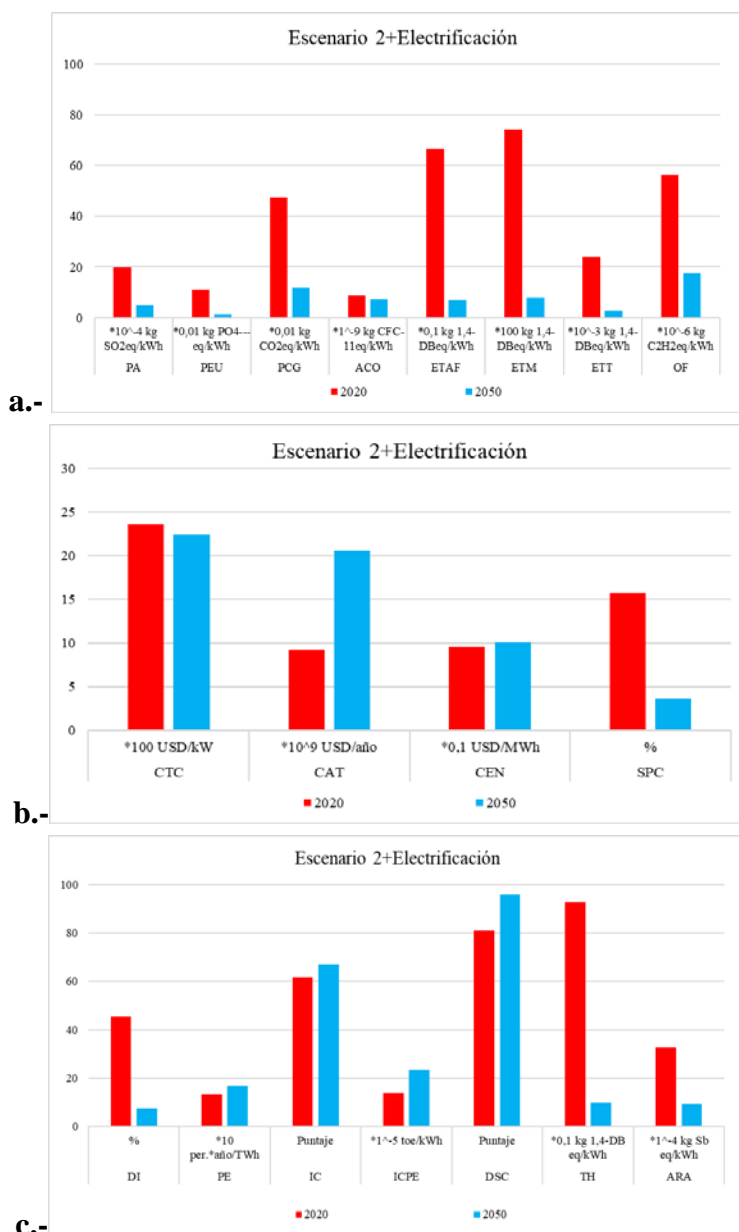
De la figura 3a se observa que el escenario evaluado al año 2050 tiene un desempeño ambiental mejor que el actual, descendiendo la intensidad de todos los indicadores ambientales. En particular al año 2050, los indicadores de PCG, ETAF, ETM, ETT y OF son los que más se reducen. Específicamente, la OF tiene una reducción cercana a un 73% a pesar de la alta contribución de las centrales solares FV que tienen una alta magnitud. Por su parte el PCG se reduce en un 79% con respecto al valor del año 2020, producto del evidente retroceso del consumo de combustibles fósiles asociados. De igual forma, el PEU y ETAF se reducen en un 91% ambos con respecto al año 2020 debido a la baja en el aporte de las centrales a carbón que son las principales tributarias, y complementado con el bajo aporte desde las centrales que las sustituyen. Por la misma razón la ETM y la ETT se reducen en igual magnitud para el escenario analizado.

En términos generales este escenario implica reducciones entre un 30% y un 91% en siete de los ocho indicadores ambientales al año 2050 producto del desplazamiento de las centrales térmicas, específicamente a carbón, provocadas por el ingreso masivo de centrales eólicas y solares FV. En particular la discreta reducción de ACO (~11%) se debe a que la contribución de las centrales solares FV es importante, la cual reemplaza la eventual reducción del gas natural entre los años 2020 y 2050 en la matriz.

En cuanto a la dimensión económica (ver fig. 3b), se observa un comportamiento disímil entre los indicadores CTC, CAT, CEN y SPC. Se observa una reducción de un 10% en el indicador de CTC debido al aporte que hacen las centrales renovables, el cual es discreto producto de que no hay diferencias dramáticas para este indicador entre las tecnologías analizadas. Por otro lado, el indicador de SPC tiene una reducción de un 91% con respecto al año 2020, siendo el más sensible a los cambios en la composición de la matriz, dado que está estrechamente ligada a las tecnologías fósiles. Por otro lado, el indicador de CAT aumenta en ambos casos debido al aumento de la generación eléctrica estimada al año 2050, mientras que el indicador del CEN aumenta un 7% durante el período, producto de los efectos sinérgicos del cambio de la matriz.

En cuanto a la dimensión social, los indicadores se proyectan al año 2050 con mejores desempeños con respecto al 2020 (ver fig. 3c). En particular el indicador de DI, TH y ARA son los que presentan las mayores mejoras, lo que se traduce en reducciones de un 88%, 91% y 76% en promedio para cada indicador, respectivamente. Estas mejoras están directamente asociada a la inclusión de centrales eólicas y solares FV producto de su autonomía con respecto a combustibles fósiles importados, su menor contribución al daño a la salud humana y al menor uso de recursos abióticos para operar. De la misma

forma, los indicadores de DSC y PE mejoran en un 26% y 50% en promedio para el año 2050, reflejando el efecto positivo sobre la dimensión social de la inclusión de tecnologías renovables en la matriz eléctrica chilena.



**Figura 3.** Indicadores para la proyección de escenarios futuros de la matriz eléctrica chilena al año 2050. a.- indicadores ambientales, b.- indicadores económicos, c.- indicadores sociales

Fuente: elaboración propia

#### 4. CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos de este estudio se tiene que:

1. El alto reemplazo de fuentes fósiles por energías renovables implica que en la dimensión ambiental se evidencia una mejora en los ocho indicadores evaluados, alcanzando reducciones que van entre 30% y 91%.
2. En la dimensión económica se presenta un comportamiento heterogéneo donde sólo la sensibilidad a precios del combustible mejora a lo largo del periodo. Para el escenario evaluado, el CTC y SPC al año 2050 se reducen en 10% y 91% el valor del año 2020, respectivamente. Asimismo, se observa un aumento del CEN en un 7% y del CAT de un 100% al año 2050.

3. En la dimensión social se evidencian importantes reducciones en DI, TH, y ARA (alrededor de 85%), mientras el incremento en ICPE, DSC y PE varían entre 25% y 107%. También se refleja una mejora del IC un incremento de un 6%.

A pesar del gran desafío en cuanto a las inversiones que implica el alto nivel de recambio tecnológico en el sector eléctrico, quedan expuestos en este trabajo, las relevantes mejoras cuantificadas principalmente a través de los indicadores ambientales y sociales reportados.

## **REFERENCIAS**

- Atilgan, B., & Azapagic, A., Assessing the environmental sustainability of electricity generation in Turkey on a life cycle basis., *Energies*, Vol. 9, No. 1, 2016, pp. 31-55.
- CNE., Comisión Nacional de Energía, Gobierno de Chile., Determinación de los costos de inversión y costos fijos de operación de la unidad de punta, en sistemas SIC, SING y SSMM, Anexo 3. <https://www.cne.cl/wp-content/uploads/2016/09/Estudio-Determinacion-Costos-Unidad-de-Punta-y-Costos-de-Inversion.rar> (Accedido en Marzo 2018).
- IEA., International Energy Agency. Projected costs of generating electricity, 2015., Edition. 30 September 2015 version, 2015, pp. 13-19. <https://www.iea.org/Textbase/nptoc/ElecCost2015TOC.pdf> (Accedido en Febrero 2018).
- ISO 14.040-44:2006., Environmental management- Life cycle assessment- Principles and framework & requirements and guidelines., International Standardization Organization.
- Ministerio de Energía., Hoja de Ruta 2050. Hacia una Energía Sustentable e Inclusiva para Chile. Santiago, Chile., 2015, pp. 184-191. Disponible en: <http://www.energia2050.cl/wp-content/uploads/2016/07/Hoja-de-Ruta-2050.pdf>
- Santoyo-Castelazo, E., & Azapagic, A., Sustainability assessment of energy systems: Integrating environmental, economic and social aspects., *Journal of Cleaner Production*, Vol. 80, No. October 2014, pp. 119–138.
- Stamford, L., & Azapagic, A., Life cycle sustainability assessment of the electricity options for the UK., *International Journal of Energy Research*, Vol. 36, No. 14, November 2012, pp. 1263–1290.
- Transparency International., Corruption Perception Index 2015., Disponible en: [https://www.transparency.org/news/feature/corruption\\_perceptions\\_index\\_2017#table](https://www.transparency.org/news/feature/corruption_perceptions_index_2017#table) (Accedido en Febrero y Marzo 2018).
- Vega-Coloma, M., Propuesta metodológica para la evaluación integrada de escenarios futuros de generación eléctrica en Chile., Tesis presentada en opción al grado Científico de Doctor en Energías., Universidad de Concepción, Chile, 2018.
- Vega-Coloma, M., & Zaror, C.A., Environmental impact profile of electricity generation in Chile: A baseline study over two decades., *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 94, No. October, 2018a, pp. 154–167.
- Vega-Coloma, M.I., & Zaror, C.A., The effect of solar energy on the environmental profile of electricity generation in Chile: A midterm scenario., *International Journal of Energy Production and Management*, Vol. 3, No. 2, 2018b, pp. 110–121.