

Solar Energy in the Mining Industry

Roberto Fuentes, Diego Rojas, Marco Rivera, José Riveros, Javier Muñoz, Patrick Wheeler

Resumen—Solar energy has become very important in recent years, mainly because it is a clean and inexhaustible source. This paper presents a review of the use of solar energy in the mining industry. A global approach will be made, indicating the uses that are given to solar energy in the mining industry, and then delving into the Chilean reality, indicating the major milestones in solar energy in the country's mining industry.

Keywords—Desalination, mining industry, photovoltaic solar plant, solar energy, thermosolar plant.

I. INTRODUCCIÓN

Se espera que para 2030 la demanda energética mundial alcance los 28513 TWh (Terawatts-hora) [1], donde el 50 % se espera que provenga de fuentes renovables, y la generación de energía proveniente de sistemas solares abarcaría un 35 % [2]. Esto se debe a que este tipo de sistema utiliza la energía proveniente desde el sol, la que alcanza el valor promedio de 1.37 kW por m^2 de extensión [3]. Este valor claramente no es fijo a lo largo de la superficie terrestre, ya que, dependiendo de condiciones geográficas y ambientales como el clima o la nubosidad, cada lugar del mundo presenta un valor distinto de irradiancia.

En [4] se realiza un estudio que mediante la aplicación del método de Köppen-Geiger-Photovoltaic (KGPV) realiza una clasificación de 28 zonas en la superficie mundial, indicando a los desiertos como los lugares con mayor proyección solar. Además, según lo expuesto en [5], se clasifican los desiertos de Atacama (Sudamérica), Arabia (Asia occidental) y el Sahara (África) como los lugares con mayor potencial solar del planeta debido a sus altos índices de irradiancia (mayores a $260 W/m^2$). No obstante, la energía solar se puede aprovechar en otros lugares, no necesaria y únicamente de los desiertos. A comienzos del 2021, países como China, Japón, Alemania, India y EEUU se posicionaban como los principales generadores de energía solar en el mundo [6]. Esto indica que, si lugares como Alemania, considerados como climas templados con irradiancia media-baja, pueden ser potencias en energía solar, entonces en gran parte del mundo se puede hacer uso de esta energía.

La industria minera, según la OEC (the Observatory of Economic Complexity), se situó en segundo lugar en el ranking de comercio mundial, comercializando US\$2.51T en producto mineral [7]. Esta industria, por el contrario de lo que hace creer, no representa una potencia en cuanto a rentabilidad.

R. Fuentes, D. Rojas. Estudiantes del Doctorado en Sistemas de Ingeniería, Facultad de Ingeniería, Universidad de Talca, Curicó, Chile (e-mail: rioberf@gmail.com, diego.rojass@utalca.cl)

M. Rivera, J. Muñoz. Facultad de Ingeniería, Universidad de Talca, Curicó, Chile (e-mail: marcoriv@utalca.cl, jamunoz@utalca.cl)

J. Riveros. Facultad Politécnica, Universidad Nacional de Asunción, Asunción, Paraguay (e-mail: joservs@gmail.com)

P. Wheeler. Power Electronics, Machines and Control Group, The University of Nottingham, Nottingham, UK (e-mail: Pat.Wheeler@nottingham.ac.uk)

Esto se debe a que su requerimiento energético también es elevado. Por ejemplo, en Chile, según [8], la industria minera se consolida como líder en consumo energético, utilizando el 34 % de la energía eléctrica generada, cifra que podría aumentar desde 25,0 TWh en 2020 hasta 33.4 TWh en 2030, representando un crecimiento de un 33,6 % en una década [9]. Junto a lo anterior, hay que sumar la característica que poseen las mineras de situarse lejos de asentamientos urbanos. Este crecimiento junto a la lejanía de las minas hace que requieran de la aplicación de energías renovables no convencionales (ERNC) para poder minimizar los costos en materia energética y aportar a la reducción de la huella de carbono.

Este paper identificará el panorama mundial del uso de ERNC en la industria minera, particularmente la energía solar fotovoltaica y solar térmica. Además, se revisará en profundidad las políticas en territorio chileno que alientan a las mineras a producir su propia energía y de qué manera éstas la ponen en práctica. Para finalizar se presentarán algunos proyectos destacados que se encuentran en desarrollo respecto a esta temática. Se espera que este artículo pueda ser considerado como un punto de partida para investigar el uso de la energía solar en la industria minera.

II. ENERGÍA SOLAR EN LA INDUSTRIA MINERA MUNDIAL

La industria minera no se queda fuera del intento de priorizar la descarbonización con el fin de aplacar las consecuencias del cambio climático, es por ello que cada vez se invierte más en la producción de energía desde fuentes renovables [10]. Esta situación se aborda intentando distintos medios, como potenciando el desarrollo del almacenamiento en potencial de hidrógeno [11], mediante la producción de energía eólica y solar fotovoltaica [12], incluso, haciendo uso de las instalaciones abandonadas como fuentes geotermales de calor [13].

En países como Sudáfrica, apenas en 2017 se comenzaron a formar entidades gubernamentales que velan por la inclusión de un porcentaje de fuentes renovables en el consumo energético de las mineras locales [14]. Pero en otros territorios, como en Estados Unidos existe la EPA (Environmental Protection Agency), que son organizaciones que se preocupan de regularizar esto.

En [12] se realiza un estudio donde los autores analizan el caso de 19 mineras que producen energía desde una fuente renovable, siendo 12 de ellas productoras de energía solar fotovoltaica, sumando un total de 360.3 MW de capacidad energética, las cuales se dividen en 25.3 MW provenientes de 6 minas en operación y 335 MW de producción en 6 minas abandonadas. Es decir, el 93 % de la energía solar generada se logra gracias al uso de instalaciones mineras abandonadas, donde se destacan la mina Meuro en Alemania con 166 MW, la mina Hamtae con 85 MW, seguida de la mina Hambaek con 80 MW, ambas en Korea.

Esta diferencia entre la producción de energía en minas abandonadas y minas operativas radican en su disposición. La producción en minas abandonadas busca inyectar toda la producción a la red, de manera de que funcionen como un parque solar. Por otra parte, la producción en minas operativas tiene la finalidad de abastecer a la propia minera.

Como se mencionó, la industria minera es una de las industrias que más consumo energético puede llegar a poseer, dependiendo de la capacidad minera del país. Lo anterior depende sustancialmente en procesos extras que han de cumplir las mineras por términos ambientales. Un aspecto que consume bastantes recursos en el uso de agua de mar como agua de servicio en los procesos mineros, donde ésta se debe desalinizar y luego transportar hacia las mineras, debido a las prohibiciones de uso de agua continental que se ha impuesto en varios territorios [15]. Junto con lo anterior, y sumando además la generación de energía por concepto de concentración solar térmica, las principales tareas que se pueden suplir con energía solar son:

- Iluminaria y cargas AC (de una fuente fotovoltaica PV).
- Desalinización de agua marina (de una fuente PV o un concentrador solar CSP).
- Aumento de temperatura en líquidos para ciertos procesos (CSP).
- Operación de maquinaria eléctrica (PV).

Para el proceso de cargas AC, sólo bastaría con la conversión de energía solar en energía eléctrica, mediante inversores de potencia, ya sea con almacenamiento o sin él, tal como se muestra en la Figura 1.

Si se desea aumentar la temperatura de un líquido o sustancia, se puede hacer uso de la energía solar térmica, mediante el uso de colectores solares, los que toman un fluido con una temperatura T_1 , y le transfieren un ΔT , aumentando la temperatura a una temperatura T_2 en función del área del colector y de cuántos colectores se utilicen [16]. En la Figura 2 se puede apreciar esta configuración.

Para desalinizar el agua existen dos métodos viables, uno en que se utiliza la energía solar térmica directamente, calentando el agua salada hasta alcanzar el punto de ebullición, para posteriormente canalizarla hacia un radiador que condense dicha agua (que para entonces será agua destilada sin concentración de sal). Este proceso se puede apreciar en la Figura 3. Finalmente, se obtiene el agua dulce luego del proceso. El otro método radica en la generación de energía eléctrica mediante paneles fotovoltaicos, la cual alimenta un proceso de electrólisis que elimina gran parte de los minerales salinos. El esquema de este proceso se puede observar en la Figura 4. Este proceso depende de una etapa de pre-tratamiento y post-tratamiento para entregar agua dulce [17].

III. ENERGÍA SOLAR Y LA MINERÍA EN CHILE

En [18] se presentan las barreras e impulsores que influyen en la adopción de tecnologías solares en la industria minera chilena desde la perspectiva de los actores mineros, incluyendo también un margen para intervenciones políticas adecuadas.

En Chile, la ley que regula el uso de agua continental pone a las mineras en la necesidad de recurrir a la desalinización [9],

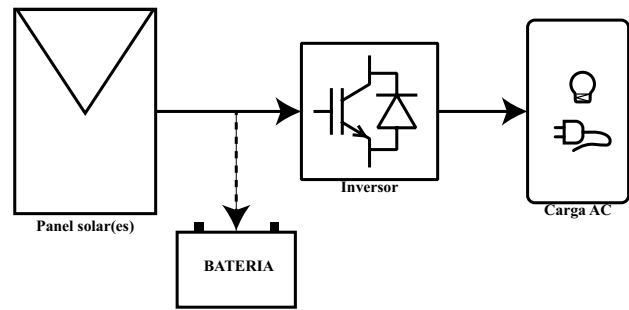


Figura 1: PV aplicado a carga AC.

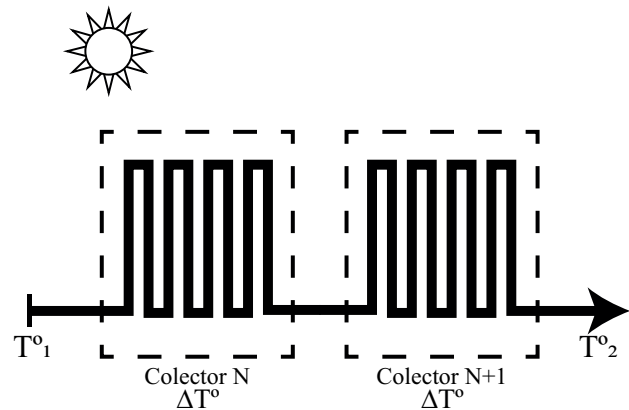


Figura 2: Esquema de colector termo-solar aplicado para aumento de temperatura en un fluido.

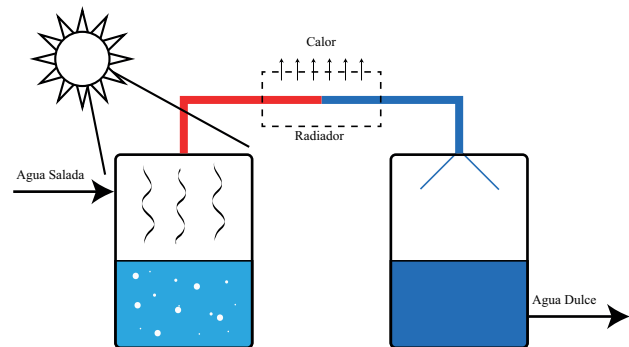


Figura 3: Esquema de desalinización mediante el uso de energía solar térmica.

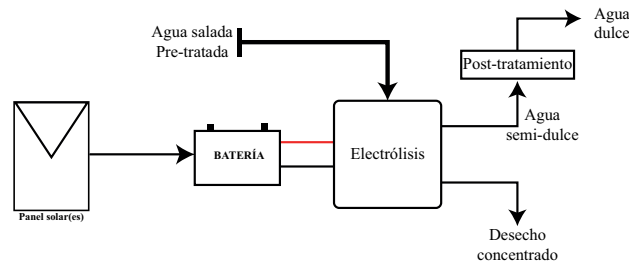


Figura 4: Esquema de desalinización mediante el uso indirecto de energía solar fotovoltaica.

lo que obliga a la instalación de plantas de desalación. Junto a esta consideración, se suma el incremento en el precio de la

electricidad, ya que este es el principal gasto en la industria, donde en 2020 este ítem ascendió a una suma de US\$2339 millones, lo cual es más del doble del gasto en combustible en el sector (US\$1031 millones) [8]. Esto ha impulsado diversos proyectos que buscan ofrecer alternativas sustentables para contrarrestar el aumento en el gasto energético.

Gracias a la posición privilegiada de Chile en cuanto a irradiación solar, complementar el suministro eléctrico con energía solar es factible. Además, el uso de la energía termo solar reduce en manera sustancial el uso de combustible en el proceso de calentar agua para el proceso [19].

IV. CASOS DESTACADOS DE INVERSIÓN SOLAR EN CHILE

El primer caso a destacar es la planta termo solar más grande del mundo Pampa Elvira Solar (PES), la cual se encuentra en la región de Atacama. Esta planta es la encargada de abastecer a la División Gabriela Mistral de Codelco, aportando energía calorífica por 56 GWh anualmente. Esto lo logra manteniendo 2952 paneles termosolares de aproximadamente 15 m^2 cada uno extendidos en una superficie de 43.9 km^2 [20]. Esta inversión permite ahorrar alrededor de US\$7 millones anuales, junto con desplazar el 80 % de uso de energía fósil, representando una disminución en la emisión de CO_2 de 15 mil toneladas de este gas.

El segundo caso a destacar es la Minera Centinela, perteneciente al grupo Antofagasta Minerals. Esta es una planta termosolar con la tecnología de colectores cilindro-parabólicos, entregando una producción anual de 25 GWh. Esta planta se diferencia a la anterior en el hecho de que posee un sistema de almacenamiento térmico de 300 m^3 . Esta tecnología plantea un impacto económico considerando un ahorro de entre US\$2 millones y US\$3 millones anuales, además de sustituir aproximadamente el 50 % del combustible fósil que utilizaba esta minera.

El último caso destacado es de comienzos del 2021. Enami es la primera minera estatal que se abastece 100 % con energía renovable, precisamente con energía solar fotovoltaica proveniente de la planta Almeyda y el parque eólico San Gabriel. La planta Almeyda posee una capacidad de generación eléctrica de 167.5 GWh anual, siendo el mayor logro hasta el momento en cuanto a uso sustentable de energías en la industria minera en Chile, esperando evitar la emisión de 120 mil toneladas de CO_2 , representando una fuerte y positivo impacto en materia medioambiental.

V. CONCLUSIONES

La minería es una industria que genera una economía bastante valiosa en distintos países, pero también se considera una de las industrias que consume gran cantidad de recursos energéticos, junto con presentar un carácter negativo frente al medio ambiente, ya que es el culpable de contribuir enormemente con la huella de carbono. Es por eso que mundialmente se han instaurado mecanismos políticos y sociales para redirigir el rumbo del consumo energético de las mineras, ya sea fuera de su vida útil (minas abandonadas), como durante su funcionamiento.

Es destacable que viejas instalaciones de una minera en desuso tengan un potencial energético tan grande que, incluso, ayuda a países como Alemania a posicionarse como potencias en energía solar.

Por otro lado, casi un tercio de la energía utilizada en la minería está destinada a aumentar la temperatura de fluidos, lo que hace completamente compatible el uso de plantas termosolares para proveer la energía calorífica que las mineras requieren.

Por otra parte, con la escasez hídrica mundial, las mineras se ven obligadas a buscar alternativas para hacer que el proceso de desalinización de agua marina sea sustentable, intentando aplacar ese enorme gasto.

Finalmente, se identifica a Chile como el gran candidato a usar el potencial solar, donde proyectos como las plantas solares térmicas son capaces de lidiar con la totalidad del requerimiento calorífico de grandes plantas del rubro minero.

Además, con lo visto, el paso que dio la minera Enami, no será el último, ya que Chile tiene el potencial solar en el norte para abastecer casi la totalidad de los requerimientos energéticos del rubro.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al financiamiento del Programa FONDECYT Regular a través del proyecto 1191028 y FONDAPE SERC Chile 15110019.

REFERENCIAS

- [1] T. Ahmad and D. Zhang, "A critical review of comparative global historical energy consumption and future demand: The story told so far," pp. 1973–1991, nov 2020.
- [2] B. Grassi, E. A. Piana, G. P. Beretta, and M. Pilotelli, "Dynamic approach to evaluate the effect of reducing district heating temperature on indoor thermal comfort," *Energies*, vol. 14, no. 1, 2021. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/1/25>
- [3] P. Hersch and K. Zweibel, "Basic photovoltaic principles and methods," vol. 1, no. 2, 1982. [Online]. Available: <https://www.osti.gov/biblio/5191389>
- [4] J. Ascencio-Vásquez, K. Brecl, and M. Topič, "Methodology of köppen-geiger-photovoltaic climate classification and implications to worldwide mapping of pv system performance," *Solar Energy*, vol. 191, pp. 672–685, 2019. [Online]. Available: <https://bit.ly/2ZV1XGD>
- [5] "Cómo los desiertos podrían proporcionar toda nuestra energía." [Online]. Available: <https://bit.ly/31BQm06>
- [6] "¿cuáles son los principales países productores de energía solar?" [Online]. Available: <https://bit.ly/301o3qQ>
- [7] "Producto mineal." [Online]. Available: <https://bit.ly/304NwAi>
- [8] "Consumo energético de la industria minera creció 33 % en la última década." [Online]. Available: <https://bit.ly/3CRGUn3>
- [9] C. C. del Cobre, "Proyección del consumo de energía eléctrica en la minería del cobre 2020-2031." [Online]. Available: <https://bit.ly/3kcnATN>
- [10] K. Pollack and J. C. Bongaerts, "Mathematical model on the integration of renewable energy in the mining industry," *International Journal of Energy Sector Management*, vol. 14, 2020.
- [11] A. Romero, D. Millar, M. Carvalho, and R. Abrahão, "100 % renewable fueled mine," *Energy*, vol. 205, p. 117964, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/300fzk4>
- [12] Y. Choi and J. Song, "Review of photovoltaic and wind power systems utilized in the mining industry," 2016. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.127>
- [13] E. Peralta Ramos, K. Breede, and G. Falcone, "Geothermal heat recovery from abandoned mines: a systematic review of projects implemented worldwide and a methodology for screening new projects," *Environmental Earth Sciences*, vol. 73, no. 11, pp. 6783–6795, jun 2015. [Online]. Available: <https://bit.ly/3CR3JXZ>

- [14] L. Marais, H. Wlokas, J. de Groot, N. Dube, and A. Scheba, "Renewable energy and local development: Seven lessons from the mining industry," *Development Southern Africa*, vol. 35, no. 1, pp. 24–38, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/0376835X.2017.1389260>
- [15] C. A. Quist-Jensen, F. Macedonio, and E. Drioli, "Integrated membrane desalination systems with membrane crystallization units for resource recovery: A new approach for mining from the sea," *Crystals*, vol. 6, 2016.
- [16] G. Barone, A. Buonomano, C. Forzano, and A. Palombo, *Solar thermal collectors*, 2019.
- [17] M. F. Platzer and N. Sarigul-Klijn, *Seawater Desalination*, 2021.
- [18] S. Nasirov and C. A. Agostini, "Mining experts' perspectives on the determinants of solar technologies adoption in the Chilean mining industry," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 95, pp. 194–202, 2018. [Online]. Available: <https://bit.ly/3ETW9MC>
- [19] "Energía solar en minería: Opción sustentable para autoabastecerse." [Online]. Available: <https://bit.ly/3qdSZZW>
- [20] "Pampa elvira solar." [Online]. Available: <https://bit.ly/3keyqPv>