

## **RESEÑA SOBRE LOS DIFERENTES USOS DE LA ENERGÍA TÉRMICA SOLAR EN LA INDUSTRIA. APLICACIONES EN EL SECTOR MINERO SOLAR THERMAL ENERGY USES IN THE INDUSTRY AND ITS APPLICATIONS IN MINING. A REVIEW**

Valdez, S.<sup>1,2,3</sup>; Thames, M.<sup>1</sup>; Orce, A.<sup>1,2,3</sup>; Kwok, L.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>INIQUI (CONICET), Av. Bolivia 5150, Salta Argentina

<sup>2</sup>Universidad Nacional de Salta, Av. Bolivia 5150, Salta Argentina

<sup>3</sup>Consejo de Investigación de la Universidad Nacional de Salta, Av. Bolivia 5150, Salta Argentina

skvaldez@gmail.com; core.mtc@hotmail.com; agustina.orce@gmail.com;  
khidalgo@unsa.edu.ar

### **RESUMEN**

La energía térmica solar es empleada en diversos sectores tales como: residencial, comercial e industrial. Según estudios preliminares, la energía solar total que recibe la Tierra en una hora es suficiente para satisfacer la demanda mundial de energía por año, siendo una alternativa sustentable en reemplazo de las actuales energías derivadas del consumo de combustibles fósiles. En Argentina la energía solar se emplea con fines domésticos: cocinas, calefones y generadores eléctricos. En el sector industrial, la energía térmica consumida es en gran medida empleada para procesos pirometalúrgicos y para el calentamiento de corrientes de procesos. Actualmente existen estudios sobre reactores térmicos solares y acumuladores de energía solar que permitirían realizar procesos térmicos continuos alcanzando temperaturas de hasta 1100° C. La mayoría de los procesos pirometalúrgicos se llevan a cabo a temperaturas entre 400-1.100°C. En este trabajo se realiza una revisión del estado del arte del empleo de la energía solar en la industria a nivel mundial, discutiendo las tendencias, el potencial de utilización, las barreras de aplicación a gran escala, el diseño de equipos y la factibilidad de su aplicación en la región de la Puna Salteña en donde diversos autores han demostrado la existencia de condiciones de irradiación únicas a nivel mundial.

**Palabras Clave:** energía solar, pirometalurgia, energías renovables.

### **ABSTRACT**

Thermal solar energy can be used in different sectors such as: residential, commercial and industrial. Preliminary studies indicate that the total amount of energy that Earth received in one hour is enough to satisfy the annual energy demand worldwide. Therefore, solar thermal energy is a green alternative to replace fossil fuels. In Argentina solar energy is used at domestic level in stoves, water heaters and electric generators. In the industrial sector thermal energy is used in different processes. Nowadays, there are studies about solar thermal reactors and solar energy storage that could be use to develop continue thermal processes, reaching up to 1.100°C. The majority of pyrometallurgical processes occurs between 400-1.100°C. In this work it is made a review about the state of the art of solar energy and it uses in industries around the world. Several authors demonstrated that Puna region has unique radiation levels worldwide. Tendencies, potential for great scale use, equipment design and the possibility of solar energy application in the Puna region are also discussed.

**Keywords:** solar energy, pyrometallurgy, green energies.

**Consumo energético en el mundo y en Argentina**

Con el crecimiento de la industria y del nivel de confort que persigue la sociedad, aumentan también los efectos negativos producto de la actividad humana tales como consumo de recursos o combustibles no renovables, generación de CO<sub>2</sub>, aumento del efecto invernadero. La concientización sobre la importancia de cuidar el medio ambiente hizo que se estudien y se lleven a la práctica el empleo de distintas formas de energías alternativas amigables con el medio ambiente; entre ellas la energía solar. Este tipo de energía puede emplearse para generar electricidad a través de un panel fotovoltaico (energía fotovoltaica) o, a través de tecnologías de concentración, puede ser convertida en energía térmica y química.

**Energía eléctrica**

En la Figura 1 se muestra el consumo energético mundial hasta el año 2018 y la proyección de la demanda hasta el 2050 de distintos tipos de energía, elaborada con datos obtenidos a partir de [1]. En la Figura se puede observar la caída en la demanda de combustibles fósiles, siendo la más notoria la del petróleo; por otro lado, para compensar esta disminución la demanda de electricidad aumenta. En la Figura 2 se muestra los GW instalados en 2019, a nivel mundial, y las proyecciones hasta el año 2024 [2], esta proyección supone que habrá un incremento en el consumo de energía eléctrica coincidiendo con lo estimado por [1].

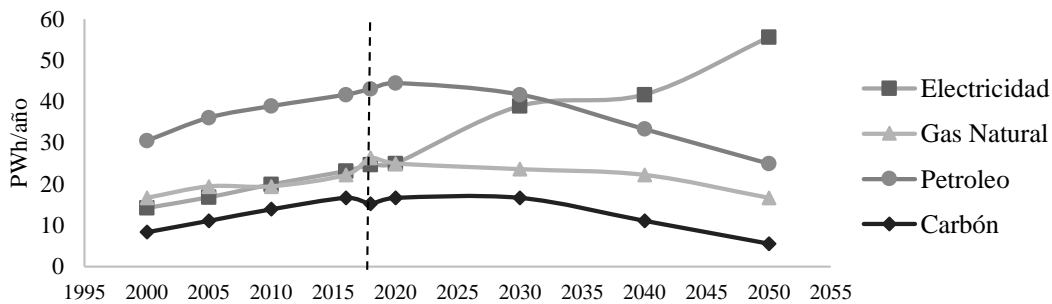


Figura 1. Demanda de Energía por año. Periodo 2000-2050. Elaboración propia a partir de [1]

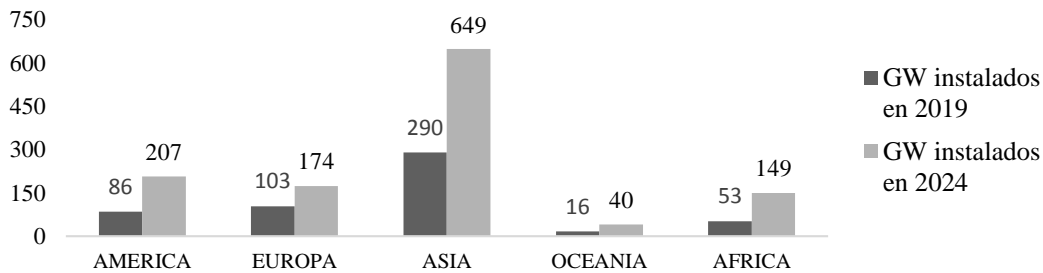


Figura 2. Potencia instalada en GW. Proyección 2019-2024. Elaboración propia a partir de [2]

En Argentina la Ley N° 26190/06 propicia el fomento para el uso de las fuentes renovables de energía destinada a la producción de energía eléctrica. Esta ley propende a la diversificación de la matriz energética Nacional favoreciendo el uso de energías renovables y contribuyendo a la mitigación del cambio climático [3]. Esto ya puede observarse en lo que respecta a la generación de electricidad a partir de la radiación solar. Hasta mayo de 2018, en las provincias de Cuyo y el Noroeste argentino, operaban 18 parques solares, con una potencia nominal entre 1-80 MW. Existen además 19 proyectos en estudio o construcción, entre ellos en Cauchari, Jujuy, de 300

MW y en Cafayate, Salta, uno de 100MW [4]. En las regiones del NOA y Cuyo, la irradiación horizontal global (GHI, por sus siglas en inglés) oscila entre 2.400 y 2.700 kWh/m<sup>2</sup> (kilowatts-hora por metro cuadrado) [5].

### **Energía solar térmica**

La energía solar térmica o energía termosolar, es un tipo de energía solar que consiste en el aprovechamiento de la energía del Sol para producir calor con el que calentar agua, otro fluido o aire mediante colectores solares. Estos sistemas pueden usarse en viviendas para suministrar agua caliente para uso sanitario o en industrias con distintos fines. Esta tecnología se ha difundido ya en varios países a nivel masivo [6]. Las aplicaciones de la energía solar térmica en procesos industriales pequeños se extienden a: precalentamiento de agua de procesos, calefacción, aire caliente y refrigeración. También en piletas de evaporación para obtener sal de salmueras, para producir vapor para la fabricación de algunos alimentos, en secadores solares para secar madera, alimentos y cultivos; cocinas solares que emplean la radiación solar para cocinar, secar y pasteurizar. La energía solar térmica se emplea también en hornos solares; destiladores solares para procesar agua potable, etc; siendo en este caso necesaria energía solar térmica de temperatura baja (60°C-80°C), media (60-100°C) y de temperatura alta (>500°C) [7]. En Argentina la energía solar se emplea con fines domésticos, ya sea para producir energía eléctrica (energía fotovoltaica) o para calentar agua, principalmente en zonas donde no existe el abastecimiento de energía eléctrica de red. Los concentradores desarrollados para las escuelas albergues son generadores de energía térmica que alcanzan temperaturas desde 100° C a 300° C y pueden ser utilizados en múltiples aplicaciones a pequeña escala. Por ejemplo, se ha resuelto el problema de producción de leche pasteurizada para la confección de queso de leche de cabra en la zona de Amblayo, en los Valles Calchaquíes, también para producción de dulces artesanales y en secaderos agropecuarios para calentar aire a 50°C [6].

A nivel industrial, en Solar Heat por Industrial Processes (SHIP), se muestra un mapa indicando los países que emplean energía solar en sus industrias y las características de las mismas. La energía solar se emplea para calefaccionar agua de proceso, aire, o el fluido necesario a temperaturas entre 50-120°C.

En Argentina, la energía solar se emplea mayormente con fines domésticos. Industrialmente una tabacalera emplea esta tecnología para la operación de secado. El área del colector solar empleado es de 737 m<sup>2</sup> alcanzando una potencia termal instalada de 516 kWth [8].

La energía solar térmica de alta temperatura utiliza la tecnología termosolar de concentración (CSP en inglés), la cual usa espejos y lentes para concentrar una gran cantidad de luz solar sobre una superficie pequeña. Esto genera mucho calor, el cual calienta un fluido y éste impulsa un motor térmico que genera electricidad. La energía solar térmica de concentración es mucho más eficiente que la energía fotovoltaica, lo cual reduce el tamaño de los colectores y, por tanto, la superficie necesaria para su instalación, disminuyendo el impacto ambiental y su costo. Este tipo de tecnología existe en California y España, quien tenía una capacidad instalada de 2.362MW a comienzos de 2016, convirtiéndose en líder mundial en CSP. Actualmente existe un interés notable por la energía solar térmica de alta temperatura de concentración en el Norte de África y el Medio Oriente, así como en India y China [9].

Otra aplicación de la energía solar térmica es como fuente de energía para la obtención de combustibles sintéticos. Para ello debe concentrarse la energía térmica antes de poder emplearla como fuente de energía para que ocurran reacciones químicas endotérmicas [10]. Yadav y Banerjee [11] realizaron un análisis de diferentes procesos industriales en donde se emplea la energía térmica señalando que el costo de producción de hidrógeno para obtener combustibles solares se estima entre 3,21-6,21 U\$S/kg. Éste es menor que el obtenido mediante ciclos

termoquímicos y electrólisis empleando energía solar concentrada (CSP), 7,17-19,26 U\$\$/kg y 3,15-10,23 U\$\$/kg respectivamente.

### **Energía solar en minería**

En lo que a minería se refiere, los requerimientos energéticos de la mayoría de las operaciones de beneficio se cubren mediante energía eléctrica. Los requerimientos de combustible empleados en los procesos del beneficio son, fundamentalmente, para los quemadores de los hornos de calcinación y fusión, de las calderas y el secado de productos. La tecnología solar existente puede cubrir total o parcialmente estas necesidades. En la actualidad existen empresas mineras en el mundo que emplean la energía térmica solar para el calentamiento de agua de proceso a temperaturas inferiores a 80°C [8]. En Chile se consumen 27.510kWth en procesos de electrodeposición de cobre mientras que en México se consumen 4.400 kWth en operaciones desarrolladas dentro de una mina de cobre, cubriendo el 58% de la demanda de calor del proceso [8] y [12]. Los procesos industriales pirometalúrgicos involucran temperaturas que pueden llegar a superar los 1000°C. El uso de energía solar concentrada para calentar hornos rotatorios para diversas aplicaciones fue estudiado previamente [13, 14, 15]. Aunque la implementación de la energía solar demostró una alta eficiencia y viabilidad técnica, la economía de los procesos impulsados por la energía solar no ha sido favorable en comparación con la de los procesos convencionales. La producción solar de cal, por ejemplo, sólo puede competir con el proceso convencional basado en combustibles fósiles si se requiere una pureza especial del producto [16]. Además, se ha demostrado que incluso un horno a escala piloto de 10 kW calefaccionado por energía solar requiere un par de horas para alcanzar un estado cuasi estable [15].

Dada las altas temperaturas involucradas los procesos pirometalúrgicos éstos deben ser continuos; en consecuencia, el calor del proceso debe proporcionarse también en ausencia de radiación solar. Para el almacenamiento de energía solar pueden emplearse reacciones termoquímicas reversibles de tipo sólido-gas o emplear vidrios silicados, Gigantino et al. [17] estudiaron el almacenamiento de energía proveniente de un concentrador solar; para ello estudiaron el ciclo de carbonatación-calcinación de la reacción entre CO<sub>2</sub> y SrO para formar SrCO<sub>3</sub>. Los autores encontraron el porcentaje óptimo de SrO en el material empleado que permite ciclos estables a 1000°C. Casati et al. [18] investigaron la capacidad de acumulación de calor de vidrios silicados; sus resultados preliminares indican que el material ensayado puede absorber la radiación solar hasta temperaturas mayores a 1.300°C. Davis et al. [20] desarrollaron un reactor que emplea energía solar concentrada para calcinar alúmina (Al(OH)<sub>3</sub>); las temperaturas de operación variaron entre 1.160-1.550 K y se obtuvo una conversión a Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> del 95,8% luego de un tiempo de residencia de 3 segundos.

Steinfeld y Müller [20] proponen un modelo de reactor que permite la gasificación de partículas carbonáceas a altas presiones; a escala laboratorio obtuvieron una conversión casi total a presiones de trabajo superiores a 3x10<sup>5</sup>Pa, con una velocidad de alimentación de 9x10<sup>-6</sup> kg s<sup>-1</sup> y una concentración de energía promedio de 2.700 soles (1 sol= 1KW m<sup>-2</sup>). La eficiencia energética a altas presiones de este reactor fue del 40%.

A modo de ejemplo, en el NOA la calcinación de boratos en horno rotativo, se lleva a cabo entre 630-1.100°C y la de caliza para obtener cal ocurre entre 900-1.200°C. Por lo tanto, la energía solar podría reemplazar la tecnología tradicional para llevar a cabo estos procesos.

### **Posibilidades de aplicación de la Energía solar en mineras**

La posibilidad que tienen las mineras de emplear energías renovables (o energías verdes) será, de acuerdo a [21] según:

*Ubicación y diseño de la mina:* relacionados con las características del terreno y clima del lugar, en donde la radiación solar de la zona y la disponibilidad de terreno son aspectos primordiales

a considerar. Dentro del diseño de la mina se destacan los perfiles de carga y la vida útil del proyecto.

*Acceso a la red:* si la minera no tiene acceso a las redes disponibles (o no son suficientes para abastecer la demanda), será necesario recurrir a fuentes alternativas de energía. En el caso de que el abastecimiento sea a través de energía solar, será necesario considerar la estabilidad del servicio ya que los procesos mineros tienen poca tolerancia a los cortes o paradas.

*Etapas del proyecto:* si bien la mayor parte de la energía requerida será consumida durante las operaciones de producción, también es posible emplear este tipo de energías en las etapas de exploración y cierre de mina, en donde las operaciones son alimentadas generalmente por generadores diésel, lo que conlleva altos costos operativos y se debe asegurar el suministro de combustible fósil.

*Legal:* de acuerdo a las normativas y leyes establecidas en el país en el ámbito de las energías renovables, las condiciones favorecen la implementación de las llamadas energías verdes.

*Beneficiarios del servicio:* la mina se beneficia de la fuente de energía alternativa, y además es posible “inyectar” los excedentes a las redes de distribución cercanas; sumado a esto, los pueblos y comunidades cercanas a los proyectos también se verían favorecidas ya que podrían acceder a energía eléctrica.

*Disminución de los costos:* el avance tecnológico hace que las proyecciones hacia el 2030 supongan una reducción de hasta un 75% en los costos operativos y de almacenamiento de energía respecto de los valores actuales (200 USD/kWh).

### Análisis FODA para la energía solar

Siguiendo la metodología empleada para la planificación estratégica, un análisis FODA nos permitirá tomar decisiones en función del análisis de los entornos internos y externos, los cuales permitirán definir las Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas para el empleo de la energía solar en nuestro país [4] y [5] (Ver Tabla 1).

Tabla 1. Análisis FODA.

<b>FORTALEZAS</b>	<b>OPORTUNIDADES</b>	<b>DEBILIDADES</b>	<b>AMENAZAS</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Desarrollo permanente de nuevas tecnologías.</li> <li>- Programas energéticos propuestos por el Gobierno Nacional.</li> <li>- Adaptabilidad de recursos a distintos procesos.</li> <li>- Condiciones climáticas favorables.</li> <li>- Precios de generación competitivos con los de países latinoamericanos.</li> <li>- Desarrollo de cadenas energéticas en bloques modulares</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Avances en el programa RenovAr.</li> <li>- Diversas empresas en el mundo utilizan esta tecnología para diferentes procesos.</li> <li>- Reducción de impuestos sobre las inversiones.</li> <li>- Reglamentaciones fijan las demandas a satisfacer para el año 2025.</li> <li>- Disminución de costos de equipos para almacenamiento de energía.</li> <li>- Posibilidad de vender los excesos y suministrar a pueblos cercanos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alto costo de inversión inicial.</li> <li>- Requerimientos de grandes espacios planos para la instalación de centrales.</li> <li>- Falta de equipos de almacenamiento de energía.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Falta de estabilidad en las políticas.</li> <li>- Las condiciones climáticas definen la adecuación de instalación.</li> <li>- Restricción en las importaciones.</li> <li>- Pandemia por el COVID-19, reduce las actividades económicas.</li> <li>- Aumento de la inflación y volatilidad del dólar.</li> </ul>

### CONCLUSIONES

En nuestro país, los índices de radiación solar de las regiones NOA y Cuyo, permiten pensar su aprovechamiento como fuente energética en procesos mineros, ya sea para generar electricidad o como fuente de energía solar térmica. Como se desarrolló en el trabajo, Argentina cuenta con suficientes antecedentes en la generación de energía fotovoltaica. Además, los nuevos desarrollos en esta tecnología, provocaron una importante disminución en los costos de instalación y operativos. De esta manera se podría cubrir total o parcialmente las necesidades del sector minero. Estos desarrollos, junto con el interés por parte del Estado en fomentar el uso de las energías renovables, propician un escenario favorable para su implementación en minería, incluso en operaciones con alto consumo energético como los procesos

pirometalúrgicos. Sin duda, los avances en el aprovechamiento de la energía solar, sobre todo en el almacenamiento energético, permitirán avanzar en el desarrollo de procesos mineros continuos cada vez más limpios, haciendo de la minería una actividad más sustentable.

## REFERENCIAS

1. Det Norske Veritas (DNV GL “Energy Transition Outlook 2019”) (2018)
2. Solar Power Europe, Global Market Outlook for Solar Power 2020 – 2024. (2020)
3. M. Roitman, A. Mestrallet, M. D. Aramburu y R. Rossi. Revista Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Vol. 2, No. 2, Septiembre 2015.
4. <https://www.argentina.gob.ar/energia/energia-electrica/renovables/plantas-de-energia-renovable>. Accedido: Mayo 2020.
5. Solar Plaza, “Energía solar en Argentina”. El Futuro Solar (2018).
6. L. Saravia. "La energía solar en Argentina". Petrotecnia. Abril, pp. 56-65. (2007).
7. <https://www.greenteach.es/la-energia-solar-todo-sobre-ella/>. Accedido: Mayo 2020.
8. <http://ship-plants.info/solar-thermal-plants-map>. Accedido: Mayo 2020.
9. <https://www.greenteach.es/la-energia-solar-todo-sobre-ella/>. Accedido: Mayo 2020.
10. A. Steinfeld. “Concentrated solar energy – the path for efficient thermal conversion to power and fuels”. Science Bulletin, Vol. 64, 485-486. (2019).
11. D. Yadav and R. Banerjee. "A review of solar thermochemical processes". Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol.54 pp. 497-532 (2016).
12. <https://www.solarthermalworld.org/news/mexico-second-solar-process-heat-case-study-copper-mining>. Accedido: Mayo de 2020.
13. B. Pohlmann, K-H. Funken and R. Dominik. “A solar heated rotary kiln for the detoxification of hazardous wastes”. J Phys. IV France 9 (1 999), <http://dx.doi.org/10.1051/jp4:1999347>. Accedido: Mayo 2020.
14. A. Meier, E. Bonaldi, G.M. Cella, and W. Lipinski. “Multitube Rotary Kiln for the Industrial Solar Production of Lime”. Transactions of the ASME, Vol. 127, pp 386-395 (2005).
15. M. Neises, S. Tescari, L. de Oliveira, M. Roeb, C. Sattler and B. Wong. “Solar-heated rotary kiln for thermochemical energy storage”. Solar Energy 86 3040–3048. (2012)
16. A. Meier, N. Gremaud, and A. Steinfeld. “Economic evaluation of the industrial solar production of lime”. Energy Conversion and Management 46, pp 905–926 (2005).
17. M. Gigantino, D. Kiwic and A. Steinfeld. “Thermochemical energy storage via isothermal carbonation-calcination cycles of MgO-stabilized SrO in the range of 1000–1100 °C”. Solar Energy, Vol.188, pp720-729 (2019).
18. E. Casati, A. Lankhorst and A. Steinfeld. “A co-located solar receiver and thermal storage concept using silicate glass at 1000 °C and above: Experiments and modeling in the optically-thick regime”. Solar Energy, Vol.177553-560 (2019).
19. D. Davis, F. Müller, W.L. Saw, A. Steinfeld and G.J. Nathan. “Solar-driven alumina calcination for CO<sub>2</sub> mitigation and improved product quality”. Green Chemistry. Vol.1 92992-3005. (2017).
20. A. Steinfeld and F. Müller. “A Pressurized High-Flux Solar Reactor for the Thermochemical Gasification of Charcoal Slurry-Two-Phase Flow and Heat Transfer Analysis”. Journal of Heat Transfer, Vol.142 (10 pages) (2019).
21. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, “La energía renovable en la minería “Programa Recursos Extractivos y Desarrollo – X4D, 2018.