



Determinación de beneficios económicos y ambientales de la utilización de la Energía  
termosolar en la Industria Metalúrgica- Minera en el 2022

Modalidad: Monografía

Angie Angélica Paola Molina Sequeda

CC 1.098.772.850

Yennifer Ximena Torres Peñuela

CC 1.005.372.842

**UNIDADES TECNOLÓGICAS DE SANTANDER**  
**Facultad de Ciencias Naturales e Ingenierías**  
**Tecnología en producción Industrial**  
**Bucaramanga Noviembre 2022**



Determinación de beneficios económicos y ambientales de la utilización de la Energía  
termosolar en la Industria Metalúrgica- Minera en el 2022

Modalidad: Monografía

Angie Angélica Paola Molina Sequeda

CC 1.098.772.850

Yennifer Ximena Torres Peñuela

CC 1.005.372.842

**Trabajo de Grado para optar al título de  
Tecnología en Producción Industrial**

**DIRECTOR**

Edwing Fabian Amaya Arias

**UNIDADES TECNOLÓGICAS DE SANTANDER**  
Facultad de Ciencias Naturales e Ingenierías  
Tecnología en Producción Industrial  
**Bucaramanga Noviembre 2022**

## Nota de Aceptación

Aprobado en cumplimiento de los requisitos exigidos  
por las Unidades Tecnológicas de Santander,  
para optar al título de tecnólogo en producción industrial,  
según el acta de comité de trabajo de grado No. 137-02-42  
del 12/12/2022. Evaluador: Diego Armando Cartagena.

  
DIEGO ARMANDO CARTAGENA

---

Firma del Evaluador



---

Firma del Director

## DEDICATORIA

*En el camino a cumplir esta meta, dedicado principalmente a Dios quien es el pilar de mi vida, quien me regaló la oportunidad de volver a estudiar, a mis padres y hermana quienes estuvieron a mi lado en todo el proceso, en cada altas y bajas para llegar al cumplimiento de la meta propuesta, a mi hija quien es mi motivación para seguir adelante y ser mejor persona tanto personal, laboral como intelectualmente, y por último a todos mis seres queridos, amigos y compañeros que estuvieron a mi lado aportando sus mejores intenciones para que hoy, pueda decir: “¡lo logre!”.*

*Esta monografía va dedicada principalmente a Dios y a la virgen María, quienes con sus bendiciones y sabiduría he podido logrado cada meta que me he propuesto, a mis padres que con su esfuerzo me han apoyado y motivado en mi formación especialmente mi madre que con su paciencia, amor y sabiduría me ha llevado por el camino del bien.*

## AGRADECIMIENTOS

Gracias a Dios por permitirnos la oportunidad de estudiar y disfrutar esta etapa de nuestras vidas, gracias a nuestros padres por educarnos en la responsabilidad, perseverancia y el respeto, valores claves para lograr este proyecto de vida, gracias a nuestros hermanas y hermanos, quienes estuvieron para nosotras a altas horas de la noche escuchando nuestras anécdotas y problemas diarios, haciéndonos saber su apoyo incondicional, gracias a mi hija por su paciencia y amor cada vez que llegaba exhausta de las largas horas de trabajo y estudios, gracias a cada una de las personas que estuvieron para nosotras que con una palabra de aliento nos impulsaron a seguir adelante, y finalmente gracias a las Unidades Tecnológicas de Santander que nos permitieron ser parte de la comunidad UTS y que nos formó como profesionales íntegros para la sociedad; Gracias a su amor, apoyo y aportes nos permiten hoy celebrar la culminación de un proyecto más de nuestras vidas.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>RESUMEN EJECUTIVO.....</b>	<b>10</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>12</b>
<b>1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>14</b>
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	14
1.2. JUSTIFICACIÓN.....	15
1.3. OBJETIVOS .....	16
1.3.1. OBJETIVO GENERAL .....	16
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
<b>2. MARCO REFERENCIAL .....</b>	<b>17</b>
2.1. MARCO CONCEPTUAL .....	17
2.2. MARCO TEORICO .....	18
2.2.1. ENERGÍAS RENOVABLES .....	18
2.2.2. COMBUSTIBLES FÓSILES .....	19
2.2.3. CONSUMO Y EFICIENCIA ENERGÉTICA .....	21
2.2.4. GASES DE EFECTO INVERNADERO .....	22
2.2.5. ODS 13: ACCIÓN POR EL CLIMA .....	23
2.3. MARCO LEGAL.....	25
<b>3. DISEÑO DE LA INVESTIGACION.....</b>	<b>26</b>
<b>4. DESARROLLO DEL TRABAJO DE GRADO .....</b>	<b>27</b>
4.1. FASE 1: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DE LAS INDUSTRIAS METALÚRGICO-MINERA QUE IMPLEMENTEN ENERGÍA TERMOSOLAR .....	27
4.2. FASE 2: IDENTIFICAR LA TECNOLOGÍA UTILIZADA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LA ENERGÍA TERMOSOLAR EN LAS INDUSTRIAS METALÚRGICA-MINERA .....	29
4.3. FASE 3: PLANTEAR POR MEDIO DEL PARÁMETRO LCOH EL BENEFICIO-COSTO DE LA IMPLEMENTACIÓN DE LA ENERGÍA TERMOSOLAR EN LA INDUSTRIA METALÚRGICA-MINERA.....	29
4.4. FASE 4: SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL DE LA IMPLEMENTACIÓN DE LA ENERGÍA TERMOSOLAR EN LA INDUSTRIA METALÚRGICA-MINERA. ....	30
<b>5. RESULTADOS .....</b>	<b>31</b>

<b>5.1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DE LAS INDUSTRIAS METALÚRGICO-MINERA QUE IMPLEMENTEN ENERGÍA TERMOSOLAR .....</b>	<b>31</b>
<b>5.2. IDENTIFICAR LA TECNOLOGÍA UTILIZADA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LA ENERGÍA TERMOSOLAR EN LAS INDUSTRIAS METALÚRGICA-MINERA .....</b>	<b>35</b>
<b>5.3. PLANTEAR POR MEDIO DEL PARÁMETRO LCoH EL BENEFICIO-COSTO DE LA IMPLEMENTACIÓN DE LA ENERGÍA TERMOSOLAR EN LA INDUSTRIA METALÚRGICA-MINERA.....</b>	<b>43</b>
<b>5.4. SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL DE LA IMPLEMENTACIÓN DE LA ENERGÍA TERMOSOLAR EN LA INDUSTRIA METALÚRGICA-MINERA. ....</b>	<b>49</b>
<b><u>6. CONCLUSIONES .....</u></b>	<b><u>53</u></b>
<b><u>7. RECOMENDACIONES .....</u></b>	<b><u>54</u></b>
<b><u>8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</u></b>	<b><u>55</u></b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fases del proyecto monográfico .....	26
Figura 2. Planta termosolar mina de cobre Gabriela Mistral para electroobtención de energía térmica.....	32
Figura 3. Plantas solares en operaciones petroleras .....	35
Figura 4. Utilización de tecnologías de acuerdo a la aplicación y temperatura.....	36
Figura 5. Un diseño simplificado de biolixiviación en pilas asistida por energía solar térmica de calcopirita .....	42
Figura 6. Diseño simplificado para secado solar de concentrado.....	42
Figura 7. Formula para calcular el parametro LCoH .....	43
Figura 8. Resultados de los 4 casos de LCoH .....	44
Figura 9. Comparación de los valores de LCOH mínimos logrados en cada planta analizada .....	46
Figura 10. Análisis del LCoH para tecnologías LFT y PTC.....	47

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Medidas frente al cambio climático por empresas del sector energético e industriales .....	24
Tabla 2. Normatividad legal para el sector minero-metalúrgico.....	25
Tabla 3. Proyectos termosolares en la industria minera del cobre. ....	33
Tabla 4. Tecnologías utilizadas para la implementación de la energía termosolar .....	38
Tabla 5. Supuestos económicos considerados .....	45

## RESUMEN EJECUTIVO

El trabajo de grado se fundamenta en la determinación de los beneficios económicos y ambientales de la utilización de la Energía termosolar en la Industria Metalúrgica- Minera en el 2022 mediante la revisión de fuentes de información secundaria sobre esta temática. En ese sentido, se aborda una metodología descriptiva con un enfoque mixto (cuantitativo-cualitativo), permitiendo la recopilación y sistematización de la información proveniente de bases documentales como Science Direct, repositorios institucionales, Dialnet y Google Académico.

Se contó con cuatro fases enmarcadas en el cumplimiento de los objetivos específicos del trabajo, donde en primer lugar se realizó una revisión bibliográfica de las industrias metalúrgico-mineras que implementan energía termosolar, para seguidamente identificar la tecnología utilizada para la implementación de la energía termosolar en las industrias metalúrgica-minera; posteriormente, se plantea por medio del parámetro LCoH el beneficio-costado de la implementación de la energía termosolar en la industria metalúrgica-minera y finalmente se determina la sostenibilidad ambiental de la implementación de la energía termosolar en la industria metalúrgica-minera

Como resultado se obtuvo la identificación de las industrias a nivel internacional que desarrollan sistemas termosolar destacándose países como Chile y Alemania; por otro lado, las tecnologías que se implementan corresponden al orden de concentración y sin concentración según la temperatura que manejan. Frente a la sostenibilidad los sistemas termosolar presentan barreras económicas considerándose poco rentables en países en vía de desarrollo.

F-DC-125

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO  
DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO TECNOLÓGICO, MONOGRAFÍA,  
EMPREDIMIENTO Y SEMINARIO

VERSIÓN: 1.0

**PALABRAS CLAVE.** Sistemas termosolar, concentración solar, sostenibilidad, energía solar, calor.

## INTRODUCCIÓN

El sector minero-metalúrgico se encarga de localizar y extraer las reservas de metales y minerales presentes en un territorio con fines lucrativos para luego ser empleados en la elaboración de joyas, aplicaciones industriales e inversiones, (INVESTOPEDIA, 2020); para ello la industria utiliza fuentes de energías convencionales como combustibles fósiles y fuentes de energías no convencionales como la solar (sistemas fotovoltaicos y termosolar), (Torres, 2020).

El desarrollo de tecnología termosolar responde hacia el cambio energético en los sectores productivos respondiendo a la descarbonización y a la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> con miras a llegar al 50% de reducción en los próximos 30 años. No obstante, en Latinoamérica el desarrollo de colectores solares para aplicaciones industriales mineras tiene muy poco uso para aplicaciones industriales sobresaliendo países como Chile que desarrolla investigaciones sobre los diferentes tipos de tecnología termosolar, (Torres, 2020).

Para procesos mineros, países como México y Colombia el sector hidrocarburos emplea sistemas energéticos para suplir con la entrega de energía a las unidades habitacionales como a los módulos de perforación (Colín, 2022); específicamente para el caso Colombiano se ha reducido el empleo de energía termosolar reemplazándola por ecoparques solares (Cooperación Alemana, 2021).

Con base a lo anterior, el desarrollo de la energía renovable emplea en su mayoría la energía térmica a baja temperatura en procesos de calentamiento de agua para uso doméstico, en procesos de reducción de sustancias y en la industria de alimentos, (De la Cruz, 2022).

En consecuencia, este trabajo monográfico tiene como objetivo realizar un análisis sobre la utilización de la Energía termosolar en la Industria Metalúrgica- Minera en el 2022 determinando sus beneficios económicos y ambientales, mediante una investigación descriptiva con enfoque mixto y metodología teórica con la finalidad de resaltar la sostenibilidad ambiental de la implementación de la energía termosolar y su relación costo-beneficio.

## 1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

### 1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El carbón es un combustible fósil responsable de más del 20% de gases de efecto invernadero que produce la industria metalúrgica-minera a la atmosfera. En respuesta, este modelo de obtención energética debe ser sustituido por otras fuentes para el funcionamiento de las industrias metalúrgica-minera donde se generen beneficios en materia económica y ambiental al implementar tecnologías de energías renovables.

China y Australia son países que lideran la industria metalúrgica- minera, donde Australia “produce alrededor del 75% del carbón negro a partir de minas a cielo abierto” (Opportimes, 2020), siendo una gran productora en la industria en donde el 85% del carbón se destina a la electricidad del país: China por su parte, cubre las necesidades energéticas en un 70% a partir del carbón (Singla, 2012). Es así, que para el 2008 se produjo cerca del 22,5% de dióxido de carbono a nivel mundial.

Las consecuencias negativas que se derivan de seguir con la fuente de energía de origen fósil son muchas: agotamiento de los recursos, dependencia energética y contaminación ambiental. Es por esto por lo que las industrias metalúrgicas-mineras deben plantear alternativas que permitan integrar tecnologías de fuentes renovables como la termosolar, la cual es eficiente y permite la disminución de costos operacionales.

Finalmente, como pregunta orientadora de la investigación se tendrá: ¿La Energía termosolar en la Industria Metalúrgica- Minera se considera viable ambiental y económicamente?

## 1.2. JUSTIFICACIÓN

La industria metalúrgica, es una de las industrias ambientalmente más contaminantes, siendo necesario implementar estrategias que permitan una transición energética enmarcada en la sostenibilidad ambiental (Valdez, 2020). Esta industria funciona continuamente asegurando el suministro de energía en todo momento, asimismo utiliza un 40% de energía en sus gastos operacionales obtenida de combustibles fósiles.

En ese sentido, desarrollar la investigación propuesta permite identificar y conocer los beneficios económicos y ambientales de la energía termosolar en el sector metalúrgico-minero ya que la implementación de un sistema energético limpio mejora el beneficio-costo y reduce la producción de gases efecto invernadero (Benito & Ruiz, 2018).

Las Unidades Tecnológicas de Santander están comprometidas en formar tecnólogos y profesionales responsables con el medio ambiente, con este proyecto se desea tener una base teórica para las empresas tradicionales de la industria metalúrgica-minera que deseen conocer los beneficios del cambio hacia la energía termosolar. Este cambio permitiría contribuir al cumplimiento del objetivo 9: construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización sostenible y fomentar la innovación y el objetivo 13: Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos, de los objetivos de desarrollo sostenible adoptado por las naciones unidas con cumplimiento para 2030, logrando de esta manera una sostenibilidad social, económica y ambiental.

## **1.3. OBJETIVOS**

### **1.3.1. OBJETIVO GENERAL**

Determinar los beneficios económicos y ambientales en la Industria Metalúrgica-Minera al utilizar la energía termosolar como principal fuente de energía mediante revisiones documentales, para determinar la relación beneficio-costos.

### **1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Realizar una revisión bibliográfica de las industrias metalúrgico-minera que implementen la energía termosolar a través del análisis de bases documentales como artículos, trabajos de grado, entre otros, con la finalidad de determinar el estado actual del uso de energías limpias en la Industria.
- Identificar la tecnología que se utiliza para la implementación de la energía termosolar en las industrias metalúrgica-minera mediante la revisión de estudios de casos para establecer las tendencias actuales de energías limpias.
- Plantear por medio del parámetro LCoH el beneficio-costos de la implementación de la energía termosolar en la industria metalúrgica-minera, para resaltar los beneficios económicos de la energía termosolar.
- Determinar la sostenibilidad ambiental de la implementación de la energía termosolar en la industria metalúrgica-minera mediante la revisión de la literatura de organismos ambientales, con la finalidad de identificar el beneficio ambiental de la energía termosolar.

## 2. MARCO REFERENCIAL

### 2.1. MARCO CONCEPTUAL

#### **Metalúrgica-minera**

En Colombia el sector minero-metalúrgico ha tenido antecedentes que han limitado la extracción minera predominando el impacto ambiental y la presencia de grupos armados, dificultando la medición del impacto que tiene el sector sobre la economía del país; lo que a su vez impide cuantificar sobre las cantidades reales de minerales producción al interior del territorio nacional. Departamentos como Antioquia, Chocó y Cauca son los mayores productos de oro; paralelamente, el departamento de Córdoba es el principal productor de níquel en Colombia mediante la explotación a cielo abierto (Echeverri, Navas, & Suárez, 2021).

En materia de composición del sector minero el níquel es el principal mineral que se produce en el país determinado por la demanda de mercados asiáticos para la producción de baterías y acero inoxidable, seguido por el carbón y el oro. El carbón de hulla, lignito, turba, minerales y concéntrales de uranio y torio son utilizados en la coquización, elaboración de productos de refinación del petróleo y actividades de mezcla de combustibles (Echeverri, Navas, & Suárez, 2021).

Departamentos como el Cesar y la Guajira desarrollan minería a cielo abierto para la extracción de carbón, de igual manera existen proyectos de mediana-pequeña escala en departamentos como Cundinamarca y Boyacá utilizando minas subterráneas. Este carbón se puede encontrar de dos formas el carbón térmico (utilizado como combustible) y carbón metalúrgico (carbón coque). Este último tipo se utiliza en procesos químicos como agente reductor en la industria metalúrgica para la fabricación de acero (Echeverri, Navas, & Suárez, 2021).

## 2.2. MARCO TEORICO

### 2.2.1. *Energías renovables*

Para Ramos (2004), las energías renovables se distinguen por ser una fuente de consumo en un periodo de tiempo inferior al necesario para su formación; estas energías mitigan las problemáticas que generan los combustibles fósiles como el agotamiento de los recursos naturales y la elevada contaminación que causa sobre el medio como la generación de residuos y cambios en las características de los recursos naturales. Asimismo, contribuyen a la generación de gases de efecto invernadero que favorecen al calentamiento.

Para Mantilla (2021), las energías renovables son aquellas obtenidas de fuentes naturales inagotables caracterizadas por la gran cantidad de energía que contienen o que son de regenerarse por medios naturales. Dentro de la energía renovable se encuentran recursos energéticos renovables llamados “Fuentes No Convencionales de Energía Renovable-FNCER” los cuales se encuentran disponibles a nivel mundial sin embargo no son implementados en el país de forma intensiva; estas fuentes son la biomasa, los pequeños aprovechamientos hidroeléctricos, la eólica, la geotérmica, la solar y los mares.

La energía renovable es considerada una energía limpia excluyendo aquellas fuentes que generan contaminación en el medio, ya que se producen a partir de recursos como el viento, el agua y el sol. No obstante, desarrollar tecnologías a partir de fuentes energéticas renovables representan un alto costo tecnológico encontrándose implementadas en mayor cantidad en zonas desarrolladas (Giraldo, Ramírez, & Quintanilla, 2018).

Para Vega de Kuyper & Ramírez (2014), la energía renovable se entiende como aquella que puede utilizarse a partir de recursos renovables que cuentan con una tasa de recuperación mayor a la extracción. Según estos autores, entre las fuentes de energía renovable se pueden encontrar:

- *Energía solar*: su fuente principal es el sol; la energía solar también llamada la energía de la luz se encarga de calentar e iluminar de manera directa la atmósfera, superficies continentales y mares. Por otro lado, este tipo de energía se utiliza para estimular el crecimiento de las plantas, generar electricidad y una variedad de usos comerciales e industriales.
- *Energía hidroeléctrica*: Emplea la energía que tienen las mareas, corrientes y gradientes de temperatura del agua.
- *Energía eólica*: Conocida como la energía del viento producto del movimiento del aire; esta energía es producida por el desigual calentamiento que ocurre en la superficie terrestre
- *Energía geotérmica*: calor que se encuentra en los materiales que hacen parte del núcleo y el manto de la tierra transmitido a la corteza terrestre, produciendo un flujo de calor.

### **2.2.2. Combustibles fósiles**

Los combustibles fósiles son aquellos que tienen un periodo de generación que dura entre miles de años hasta millones de años teniendo una tasa de regeneración mayor al tiempo de extracción; por lo cual, la cantidad de estos hidrocarburos no aumenta en el periodo próximo de la civilización humana, considerándose como recursos no renovables, (Ferrari, 2013).

Los combustibles fósiles incluyen materiales, elementos y/o fuentes que proceden de la transformación de restos orgánicos y organismos vivos que quedaron sepultados hace millones de años en la corteza terrestre, (Ramos, 2004). Dentro de

ellos se pueden encontrar el petróleo con una alta densidad energética (produce materia prima como la gasolina y aceites pesados), el carbón (roca sedimentaria compuesta por carbono, hidrogeno y oxigeno) y el gas natural comprendido por hidrocarburos gaseosos utilizado para iluminar viviendas y como fuente de centrales eléctricas.

Para Ferrari (2013), la energía química del petróleo, gas y carbón como “recursos finitos” proviene de la energía solar contenida de procesos geológicos, la cual fue capturada mediante la fotosíntesis de plantas y acumulada junto con concentraciones de materia orgánica en “cuencas marinas someras”, donde posteriormente por acciones de sepultamiento a lo largo del tiempo genero una mayor presión y temperatura provocando su transformación.

A partir de esta formación, el petróleo y gas migra hacia la superficie gracias a la densidad que ahora posee; sin embargo, en condiciones geológicas se acumula en roca porosas dando como resultado reservorios que contienen grandes cantidades de hidrocarburos.

El aprovechamiento de la energía que se encuentra almacenada en los recursos fósiles genera impactos negativos en el medio ambiente, desde los procesos de recuperación, transporte, procesamiento hasta el uso final encontrándose residuos que afectan a los recursos suelo, agua y aire. En particular, se emite concentraciones de gases como el CO<sub>2</sub>, CO, Sox, NOX, H<sub>2</sub>S y CH<sub>4</sub> y material particulado alterando el comportamiento físico de la atmosfera terrestre (Mondragón, 2021).

En base a lo anterior, estos gases son los responsables de inducir un mayor calentamiento en los océanos y en el aire que se encuentra cerca de la superficie terrestre; asimismo, favorece la acidificación de los mares. Otra de los efectos de

estos gases es el cambio climático reflejándose sequías, lluvias torrenciales, inundaciones y la generación de olas de calor que da como lugar los incendios forestales en zonas boscosas (Mondragón, 2021).

### **2.2.3. Consumo y eficiencia energética**

Se define como el gasto total de la energía de una fuente energética asociado al gasto de luz, energía eléctrica, gas o biomasa medido en kilovatios por hora. Este concepto suele ir a la mano de la eficiencia energética, ya que a mayor consumo menor será la eficiencia del proceso (TotalEnergies, 2021).

Para Fernández (2021), el consumo energético hace referencia a la energía que se emplea para llevar a cabo una acción de fabricación o en su defecto actividades diarias requeridas para habitar en una casa y/o edificio como el consumo de servicios como la luz, agua, gas o cualquier fuente de energía. En concordancia a lo anterior, el consumo energético puede proceder de más de una fuente energética.

Infoenergía (2019), argumenta que el consumo energético es el gasto total de energía para diferentes usos que lleve a cabo una empresa, compañía o sector económico; en caso de hogares se aplica al empleo de energía eléctrica, gas y biomasa.

En base a lo anterior, la eficiencia energética responde a la forma en la que se gestiona y optimiza el consumo de energía. En consecuencia, un proceso se considera eficiente cuando produce una mayor cantidad de bienes o servicios con la misma o menor cantidad de energía (Mantilla, 2021).

Para Carrera, Monteagudo y Perdomo (2021) la eficiencia energética es una fuente energética de producción más limpia ya que no permite que se incrementen las emisiones por la utilización de energías. En procesos de sectores económicos, la

eficiencia energética puede ser medida mediante la materia prima consumida en el proceso o en el desecho generado (Sheldon, 2018).

#### **2.2.4. Gases de efecto invernadero**

Los gases de efecto invernadero se encuentran localizados en la atmósfera, los cuales contribuyen al calentamiento global. La fuente de estos gases puede originarse naturalmente (siendo parte el Hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>), Hidrofluorocarbonos (HFC's) y perfluorocarbonos (PGC's)) o de forma antrópica encontrándose gases como el vapor de agua (H<sub>2</sub>O), Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), Óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), Metano (CH<sub>4</sub>) y el Ozono (O<sub>3</sub>) (Cepsa, 2015). Estos gases están conformados por frecuencias vibracionales localizadas en la parte infrarroja del espectro (PNUD, IDEAM, MADS, & DNP, 2015)

Estos gases son compuestos cuyas concentraciones (gases trazas) incrementan significativamente la temperatura de la baja atmósfera, ya que poseen características de absorción de radiación infrarroja estimulando a la atmósfera a emitir radiaciones de ondas más largas; una parte de esta radiación se libera hacia el espacio mientras que la restante se irradia nuevamente a la superficie de la tierra (PNUD, IDEAM, MADS, & DNP, 2015).

El efecto neto de este fenómeno faculta el almacenamiento de más energía alrededor de la superficie de la Tierra que la cantidad que pudiera almacenar si no contara con la atmósfera, albergando una temperatura mayor a 33°C; este fenómeno se conoce como el efecto invernadero natural, el cual permite la vida en el planeta calentando el planeta (Ballesteros & Aristizabal, 2007).

Este efecto proveniente de los gases se debe principalmente a tres factores como la cantidad o concentración de los GEI en la atmósfera, el tiempo en el que permanecen y el “nivel de impacto en la temperatura global”. Dos terceras partes de

la concentración de GEI proviene de las emisiones de CO<sub>2</sub> del sector energético, el restante de emisiones proviene de actividades como la agricultura la explotación de la tierra y otros procesos industriales (Cepsa, 2015).

### **2.2.5. ODS 13: Acción por el Clima**

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible conocidos como “Objetivos Mundiales” fueron adoptados por todos los Estados que hacen parte de las Naciones Unidas en 2015. Estos objetivos son un llamado universal para poner fin a la pobreza, preservar el planeta y garantizar que todas las personas gocen de paz y prosperidad para 2030 (Mantilla, 2021).

Los 17 ODS están integrados entre sí, puesto que reconocen que las intervenciones en un área afectarán los resultados de otras y que el desarrollo debe equilibrar la sostenibilidad medio ambiental, económica y social (Mantilla, 2021).

Entre los 17 objetivos se encuentra el ODS 13: Acción por el clima el cual tiene como objetivo la introducción del cambio climático como un tema importante para la estructuración de políticas, estrategias y planes de países que mejoren la respuesta ante el calentamiento global. Asimismo, el ODS13 promueve la educación de la sociedad como un mecanismo sensibilizar sobre el fenómeno (Pacto Mundial Red Española, s.f).

De igual forma, se insta a los estados a cooperar económicamente para cumplir con los objetivos de la “Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático” y a contribuir con los países que se encuentran en vía de desarrollo y pequeños estados insulares con la finalidad de optimizar la capacidad que tienen para afrontar el cambio climático enfatizándose en las

problemáticas que genera en las mujeres, jóvenes y comunidades marginadas, (Pacto Mundial Red Española, s.f).

Para el sector privado, este juega un papel en la generación de estrategias que permita la reducción de emisiones de CO2 a la atmosfera mediante la promoción de energías renovables reduciendo el uso de combustibles fósiles en sus actividades (Pacto Mundial Red Española, s.f).

Las empresas del sector energético e industrial se encuentran directamente ligadas a este objetivo; sin embargo, todas estas son autónomas de tomar medidas para contribuir al ODS13. Dentro del ámbito interno y externo las compañías contribuyen de la siguiente manera (Tabla 1):

**Tabla 1.**  
*Medidas frente al cambio climático por empresas del sector energético e industriales*

<b>ÁMBITO INTERNO</b>	<b>ÁMBITO EXTERNO</b>
-Incorporación del cambio climático en la cultura empresarial	-Medición de la huella de carbono en todos los procesos de la empresa
-Compensación de emisiones de CO2 mediante proyectos de reforestación	-Elaboración de políticas y planes de actuación contra el cambio climático
-Inversiones en adaptaciones climáticas que reduzcas los efectos del cambio climático	-Formación del personal de la empresa, proveedores y demás grupos de interés en la lucha contra el cambio climático
-Implementar análisis de riesgos y oportunidades del cambio climático en la cadena de valor	-Inclusión de acciones de mitigación y adaptación al cambio climático en los planes de acción de la empresa
-Inversiones en tecnología que permita capturar y almacenar el carbono	-Fijación de un precio interno del carbono como mecanismo de gestión
-Implementar tecnologías limpias y menos intensivas en la emisión de carbono	-Disminución del uso de combustibles fósiles en los procesos operativos de las empresas y sustitución por fuentes de energía renovable.
-Establecimiento de criterios de eficiencia energética, uso de energías renovables y resiliencia a los desastres climáticos.	-Promoción de la movilidad sostenible del personal y distribuidores con el objetivo de reducir las emisiones de CO2
-Desarrollo de bonos verdes que financien proyectos sostenibles en ramas como la energía renovable, eficiencia energética o transporte limpio	-Introducir los criterios de economía circular en las actividades de la empresa mediante la utilización de los recursos naturales y materias primas
-Inversiones en IDi	-Promover el respeto por los ecosistemas y la biodiversidad en los procesos de la empresa.
	-Diseño e instauración de planes de mitigación de riesgos y recuperación en relación a los desastres naturales en zonas de alto riesgo.

Fuente: Pacto Mundial Red Española (S.f)

## 2.3. MARCO LEGAL

Para el desarrollo de la normatividad referente al sector minero-metalúrgico y el uso de energías renovables en el territorio nacional, la Tabla 2 realiza una descripción de las normas que se han estipulado.

**Tabla 2.**

*Normatividad legal para el sector minero-metalúrgico*

<b>NORMA</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
<b>Ley 685 de 2001</b>	Código de Minas
<b>Ley 697 de 2001</b>	Se promueve el uso racional y eficiente de la energía e implementación de energías alternativas
<b>Resolución 180919 de 2010</b>	“Plan de Uso Racional y Eficiente de la Energía”
<b>Ley 1665 de 2013</b>	Se aprueba el “Estatuto de la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA), por sus siglas del inglés International Renewable Energy Agency”.
<b>CONPES 3762 de 2013</b>	“Lineamientos para el Desarrollo de proyectos de Interés Nacional y Estratégicos (PINES)”
<b>Ley 1715 de 2014</b>	Diversifica el sistema energético para el desarrollo de inversiones en tecnologías renovables
<b>Decreto 2691 de 2014</b>	Se definen los mecanismos para acordar con los entes territoriales las medidas para la conservación del ambiente sano
<b>Resolución 161 de 2016</b>	Se estructuran estrategias de integración de Fuentes No Convencionales de Energía Renovables al parque generador
<b>Decreto 348 de 2017</b>	Establece los “lineamiento de la gestión eficiente de energía y entrega de excedentes de autogeneración a pequeña escala”.
<b>Ley 1931 de 2018</b>	Se establecen directrices para la gestión del cambio climático
<b>Decreto 2652 de 2018</b>	“Establece la exigencia de diagnósticos ambientales de alternativas para desarrollar proyectos de exploración y uso de energía alternativa”.

Fuente: (UPME & Ecosimple, 2019); (Cooperación alemana, 2021).

### 3. DISEÑO DE LA INVESTIGACION

El estudio monográfico se encuentra dividido en cuatro fases mediante un enfoque cuantitativo-cualitativo que dará paso a interpretar el parámetro LcoH identificando el beneficio-costo de implementar energía termo solar en la industria metalúrgica-minera. Por otro lado, el tipo de investigación descriptiva permitirá obtener información a través de fuentes secundarias sobre la energía termo solar el estado de su implementación en la industria metalúrgica-minera, las tecnologías que se emplean para su desarrollo.

Mediante el método de análisis se determina la sostenibilidad ambiental de la energía termosolar en la industria metalúrgica minera. Finalmente, la Figura 1 presenta las fases del proyecto.

Figura 1. Fases del proyecto monográfico



Fuente: Autores

## 4. DESARROLLO DEL TRABAJO DE GRADO

### 4.1. Fase 1: Revisión bibliográfica de las industrias metalúrgico-minera que implementen energía termosolar

La realización de la revisión bibliográfica de las industrias metalúrgico-minera que implementen la energía termosolar se llevó a cabo mediante el análisis de bases documentales como ScienceDirect, Dialnet, Google Académico, repositorios institucionales y bases de datos de ente gubernamentales como el UPME, MADS, Minminas y Minenergía recolectado artículos, trabajos de grado, informes entre otros, con la finalidad de determinar el estado actual del uso de energías limpias en la Industria.

Entre las bases documentales se recolectaron las siguientes:

- Baig, M; Surovtseva, D; Halawa, E. (2015). "The Potential of Concentrated Solar Power for Remote Mine Sites in the Northern Territory, Australia". Revista de energía solar. (2015). 1-11. <https://doi.org/10.1155/2015/617356>
- Behar, O., Peña, S., Kouro, W., Fuentealba, E., Moran, L., Sbarbaro, D. (2021). "El uso de la energía solar en los procesos mineros del cobre: Una revisión integral". Ingeniería y Tecnología. (4). 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100259>.
- Cooperación alemana (2021). "Implementación de fuentes no convencionales de energías renovables (FNCER) en el sector minero colombiano". Cooperación alemana: Colombia.
- Dellicompagni, P., Franco, J., Flexor, V. (2021). "Reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> mediante la integración de energía solar de concentración en la minería de litio". Energy Fuels. 35(19). 15879-15893. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.1c01951>

- Farjana; S., Huda; N., Mahmud, MA., Lang, C. (2019). “Evaluación del ciclo de vida de los procesos mineros solares integrados: un futuro sostenible”. Revista de producción más limpia. (236). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117610>
- Sharbaro, D., Behar, O., Morán, L. (2021). “¿Cuál es la tecnología de energía solar más competitiva para la integración en las plantas mineras de cobre existentes: ¿fotovoltaica (PV), energía solar de concentración (CSP) o híbrida PV-CSP? Revista de producción más limpia. (287). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125455>
- Serrano-Guzmán, M., Pérez-Ruiz, D., Galvis-Martínez, J., Rodríguez, M., Correa, S. (2017). “Análisis prospectivo del uso de energía solar: Caso Colombia”. Investigación y Ciencia. 25(71). 85-93. <https://www.redalyc.org/pdf/674/67452917011.pdf>
- Tasbirul, M., Huda, N., Abdullah, AB., Saidur, R. (2018). “Una revisión exhaustiva de las tecnologías de energía solar de concentración (CSP) de última generación: estado actual y tendencias de investigación”. Revisiones de energía renovable y sostenible. (91). 987-1018. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.097>
- Vásquez, J (2013). “Cogeneración solar: Integración entre minería y energía”. Santiago de Chile: Universidad de Chile.

En base a las fuentes documentales recolectadas, esta fase identificara las industrias metalúrgicas-mineras que implementan la energía termosolar en sus procesos en un orden internacional y describirá aquellas que se encuentran en el territorio nacional.

#### **4.2. Fase 2: Identificar la tecnología utilizada para la implementación de la energía termosolar en las industrias metalúrgica-minera**

Para la identificación de las tecnologías que se utilizan para la implementación de la energía termosolar en las industrias metalúrgica-minera esta fase se enmarcó en la revisión de estudios de casos para establecer cuáles son las tendencias actuales de energías limpias.

En concordancia se tendrán en cuenta tres parámetros de exclusión e inclusión de la siguiente forma:

- **TITULO:** Tendrá mayor relevancia las fuentes de información secundaria cuyo título se relacione con el sector metalúrgico-minero y las tecnologías que desarrollan para la utilización del calor proveniente de la energía termosolar.
- **CONTENIDO:** Lectura del contenido total de la base documental, con el propósito de identificar aquellos que describan las tecnologías que se emplean para aprovechar el calor de la energía termosolar en los procesos metalúrgicos-mineros.
- **VENTANA DE TIEMPO:** Se contará con una ventana de tiempo que no supere un tiempo de siete años desde la publicación de la base documental hasta el año presente.

#### **4.3. Fase 3: Plantear por medio del parámetro LcoH el beneficio-costo de la implementación de la energía termosolar en la industria metalúrgica-minera.**

En primer lugar, esta fase contextualizará el parámetro LcoH describiendo su significado para posteriormente determinar el beneficio-costo de la implementación de la energía termosolar en procesos industriales y en la industria metalúrgica-minera con la finalidad de resaltar los beneficios económicos de la energía

termosolar. Para ello, se tendrán en cuenta artículos científicos de revistas de investigación a nivel internacional.

#### **4.4. Fase 4: Sostenibilidad ambiental de la implementación de la energía termosolar en la industria metalúrgica-minera.**

La sostenibilidad ambiental de la implementación de la energía termosolar en la industria metalúrgica-minera será determinada mediante una búsqueda documental identificando aquellas fuentes bibliográficas provenientes de organismos ambientales, con la finalidad de identificar el beneficio ambiental de la energía termosolar.

## 5. RESULTADOS

### 5.1. Revisión bibliográfica de las industrias metalúrgico-minera que implementen energía termosolar

La energía solar se puede aprovechar de distintas maneras as allá de las tecnologías fotovoltaicas, como por ejemplo la concentrated solar power-CSP conocida también como la energía termosolar. Esta tecnología permite el aprovechamiento del calor en procesos industriales y minero-metalúrgicos empleado para el calentamiento de soluciones de lixiviación, (Cooperación Alemana, 2021).

Para Farjana et al (2019) la integración de la energía solar en los procesos mineros puede emplearse para el calentamiento mediante sistemas termosolares de procesos industriales de baja temperatura como los colectores solares

Países como EE.UU utilizan la tecnología CSP para la generación de electricidad, a su vez se emplea la CSP en la etapa da de construcción de proyectos mineros reduciendo la "intermitencia" de la radiación solar; por otro lado, China e India mediante inversiones agresivas están iniciando la utilización de esta tecnología para la generación de electricidad (Tasbirul, Huda, Abdullah, & Saidur, 2018).

Existen análisis realizados en países como Australia y Chile en los cuales emplean la energía termosolar en el sector minero de forma intensiva, en este último el aprovechamiento de la energía solar se fundamenta gracias a que las minas se encuentran localizadas en "regiones con altos recursos solares" siendo una estrategia amigable que satisface la demanda energética en la industria (Sharbaro, Behar, & Morán, 2021). Es así, que en el Norte Grande de Chile se realiza mediante un ciclo Rankine para la generación de energía eléctrica (Vásquez, 2013). De igual

manera, en Chuqicamata existe una planta termosolar de 54.000 MWh/año utilizada en los procesos de electro-obtención y electro-refinación de metales como el cobre; esta planta contiene un "acumulador térmico" cuya función es mantener el almacenamiento de agua caliente a 95°C y dispone de un dispositivo de limpieza en seco mediante un calentamiento indirecto que consta de dos bucles, (Behar, y otros, 2021).

Asimismo, el proyecto termosolar llamado "Pampa Evita 32,2 MW" suministra calor a la empresa Minera Gabriela Mistral mediante un sistema de colectores que contiene un dispositivo encargado de la limpieza en seco; la inclinación de este sistema se ajusta estacionalmente (ver Figura 2).

*Figura 2. Planta termosolar mina de cobre Gabriela Mistral para electroobtención de energía térmica.*



Fuente: Behar et al (2021).

En Iquique, Tarapacá el proyecto "Espejo Tarapacá" combina la energía solar con el almacenamiento por bombeo, (Behar, y otros, 2021). La empresa minera El Tesoro ahora llamada minera Centinela desarrollo en el 2011 un proyecto de CSP reemplazando el uso de diésel (3700 metros cúbicos al año) empleado para aumentar la temperatura de la solución de cobre lixiviado por tecnologías limpias; en ese orden de ideas, el proyecto produce 24.445 MWht/año de energía termosolar a través de colectores (Cooperación Alemana, 2021).

Finalmente, la Tabla 3 presenta un consolidado según Behar et al (2021) de las industrias metalúrgico-mineras en Chile que emplean energías renovables en sus procesos; por otro lado según los autores existen proyectos termosolares que se encuentran en operación para el suministro de calor como el proyecto "Pampa Evita"

**Tabla 3.**

*Proyectos termosolares en la industria minera del cobre.*

COMPAÑÍA MINERA	MINA	TECNOLOGÍA SOLAR	CAPACIDAD (MV)	PROCESO MINERO
Minerales de Antofagasta Codelco	El tesoro	Solar térmica (cilindro parabólico)	10.5	Electro-obtención
	Gabriela Mistral	Solar térmica (captador de placa plana)	32	Electro-obtención
SCM	Minera Constanz	Solar térmica (captador plano)	0,308	Electro-obtención

Fuente: Behar et al (2021).

Los parámetros como la temperatura y el consumo de calor de los procesos se utilizan para determinar la capacidad térmica de las plantas mencionadas en la anterior Tabla. Estos valores arrojan que la energía solar es una tecnología que puede ser empleada para satisfacer las actividades mineras con energía térmica (Dellicompagni, Franco, & Flexor, 2021).

En Australia, el Territorio del Norte-NT presenta altos índices de radiación solar; asimismo, esta zonas alberga mineras que emplean combustibles fósiles favoreciendo el cambio climático como la mina del río McArthur, mina Ranger, minas de oros y operaciones Tanami donde los autores Baig, Surovtseva, & Halawa (2015) adelantan estudios sobre la implementación de tecnologías CSP para suplir las necesidades operativas de las mineras y reducir el impacto ambiental que se genera por la emisión de gases efecto invernadero.

En Colombia, en términos de despliegue la energía solar térmica aplicada en procesos industriales como la metalúrgica-minera es de aja aplicación en relación

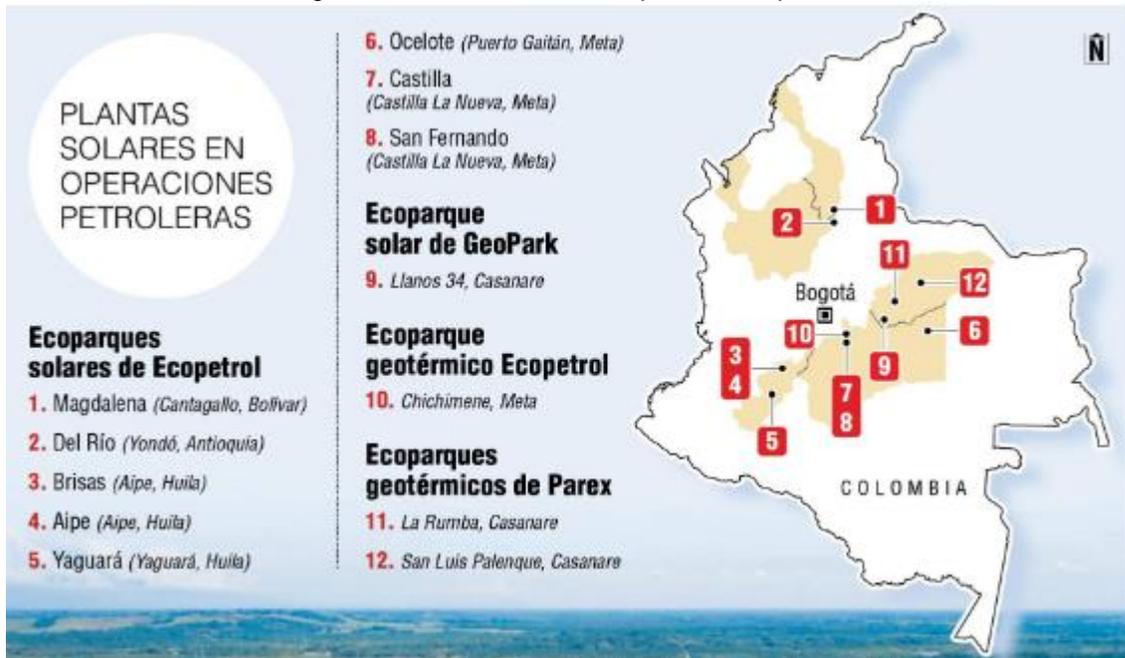
con el sector residencial; no obstante, se ha observado un aumento importante en la inserción de estas tecnologías con propósitos de reducir el impacto ambiental que genera en el sector industrial, (Serrano-Guzmán, Pérez-Ruiz, Galvis-Martínez, Rodríguez, & Correa, 2017).

El sector metalúrgico-minero ha optado por la provisión energética con propuestas bajas en carbono como la implementación de proyectos que emplean fuentes no convencionales de energías renovables-FNCER y abastecimiento por parte de proveedores a través de compra de energía en el sector. Para 2019 el sector minero empleaba como fuentes de energía el gas natural, el Diésel oil, la energía eléctrica SIN y gasolina motor; la hidroenergía, autogeneración y cogeneración no tuvo algún nivel de consumo para este año; en casos como la autogeneración a través de pequeñas centrales hídricas abarco el 90-70% del consumo interno (Cooperación Alemana, 2021).

En concordancia con lo anterior, un ejemplo de la utilización de sistemas de energía renovable en el país se encuentra en la Figura 3; en la cual se observa que la explotación de petróleo se emplean sistemas de ecoparques solares abastecidos de paneles solares para la producción de energía eléctrica, (ElColombiano, 2022).

Los Ecoparques geotérmicos ubicados en Casanare implementados por la compañía "P Canadiense" aprovecha las temperaturas de los volúmenes de agua producido en el proceso de extracción para la generación de energía mediante equipos instalados en la superficie, con la finalidad de producir alrededor de 100 Kilovoltios de electricidad". En síntesis, estos pilotos PAREX permite convertir el calor producido en las capas de la corteza terrestre en energía, (ElColombiano, 2022).

Figura 3. Plantas solares en operaciones petroleras



Fuente: EIColombiano (2022)

A modo de conclusión, Chile es uno de los países que más emplean el uso de fuentes de energía renovables limpias en sus minas ya sea para abastecimiento energético o incorporando las tecnologías de CSP en sus procesos de obtención de metales convirtiéndose en uno de los mercados solares más grades de América Latina, (Nasirov & Agostinib, 2018).

## 5.2. Identificar la tecnología utilizada para la implementación de la energía termosolar en las industrias metalúrgica-minera

Para el Instituto Mexicano del Petróleo (2018), los sistemas termo solares empleados para generar calor en los procesos metalúrgicos-mineros se dividen en sistemas sin concentración encontrándose captadores planos y los sistemas de concentración albergando tecnologías de concentrador parabólico, canal parabólico, concentrador tipo Fresnel, receptor de torre central y plato parabólico.

La característica de estas tecnologías es la alta temperatura que pueden producir (Osornio-Cárdenas, Domínguez-Barreto, Miranda-Hernández, Reyes-Sandoval, & Vargas-Rosas, 2022), como también la generación de energía a precios asequibles ya que el costo de instalación se encuentra incorporado en la inversión inicial (Ortega, 2018). Estas tecnologías emplean colectores solares para captar la irradiación solar.

El Instituto Mexicano del Petróleo (2018) argumenta que las aplicaciones de tecnologías termosolares se clasifican según la temperatura en la cual operan existiendo aplicaciones de baja, media y alta temperatura con sus respectivos materiales (ver Figur 4).

Figura 4. Utilización de tecnologías de acuerdo a la aplicación y temperatura



Fuente: Instituto Mexicano del Petróleo (2018)

Las tecnologías mencionadas en la Figura 4 emplean colectores para captar la radiación solar mediante absorbedores; estos colectores están compuestos de un circuito en el cual circula un fluido de transferencia de calor. Por otro lado, las aplicaciones de temperatura media (100-400°C) emplean tubos evacuados y concentradores solares y las aplicaciones de alta temperatura (mayor a 400°C)

están compuestos de espejos para concentrar la energía, (Instituto Mexicano del Petróleo, 2018).

Para Colín (2022), las tecnologías termosolares se dividen en la industria metalúrgica-minera en aplicaciones de baja a media temperatura y en aplicaciones de alta temperatura; las primeras son tecnologías que han tenido aplicaciones comerciales para el sector doméstico como captadores de radiación solar mediante hojas metálicas con recubrimientos de alto rendimiento empleando paneles de cama plana y/o tubos evacuados operando con hasta temperaturas de 353 K. a su vez, los autores establecen que las aplicaciones se caracterizan por ser tecnologías sin concentración o de concentración.

Los colectores termosolares son dispositivos cuya función es la transformación de la energía solar en térmica mediante diferentes características de funcionamiento según el tipo de colector que se emplee, (Evangelisti, De Lieto, & Asdrubali, 2019). En aplicaciones industriales las variables que se tienen en cuenta para su instalación es la temperatura objetivo, el requerimiento energético, capacidad de inversión, disponibilidad de la zona y el grado de madurez de la tecnología, (Ghazouani, Bouya, & Benaissa, 2020).

Entre los colectores sin concentración se encuentran el colector de placa plana el cual transforma la energía solar térmica mediante un sistema compuesto por un panel compuesto por una cubierta acristalada permitiendo el paso de la radiación solar hasta ser absorbida gracias a una placa absorbente y un fluido caloportador para finalmente ser almacenada o utilizada de forma directa, (Carrión-Chamba, Murillo-Torres, & Montero-Izquierdo, 2022).

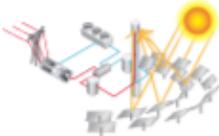
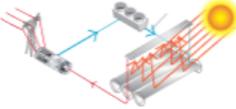
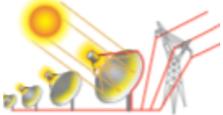
El otro tipo de colector sin concentración es de tubos de vacío conformado por un conjunto de tubos de cristal donde cada uno de ellos se compone por dos tubos

concéntricos. Este sistema cuenta con una capa absorbente en los tubos interiores y un sellado al vacío en cada unidad cuyo objetivo es la reducción de las pérdidas de calor por convección y conducción, (Parvez & Morimot, 2018).

Baig, Surovtseva, & Halawa (2015), plantean que las tecnologías termosolares con concentración se clasifican en sistemas cilindroparábolicos, sistemas receptor torre central, tecnologías Fresnel y discos parabólicos; según los autores, un contexto global 18 países se encuentran en la inserción de sistemas termosolares de estos el 90% corresponde a sistemas cilindroparábolicos, el 8% sistemas de reflector Fresnel lineal, alrededor del 2% sistemas de torre central y menos del 1% sistemas de disco parabólico.

En ese sentido, los autores plantean la Tabla 4 con las especificaciones para estos cuatro tipos de tecnologías empleadas para la recolectar la radiación solar.

**Tabla 4.**  
*Tecnologías utilizadas para la implementación de la energía termosolar*

TECNOLOGÍA	COLECTORES CILINDRO PARABOLICO	SISTEMA DE TORRE CENTRAL	SISTEMA FRESNEL	SISTEMA DE PLATO PARABOLICO
Bosquejo				

F-DC-125

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO  
DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO TECNOLÓGICO, MONOGRAFÍA,  
EMPRENDIMIENTO Y SEMINARIO

VERSIÓN: 1.0

Descripción	Madurez	Capacidad	Rango de °C	Ciclos de potencia	Eficiencia de la planta	Eficiencia solar a kWh
Está compuesto por reflectores parabólicos que enfocan los rayos solares y por tuberías compuestas por fluidos de transferencia de calor pasando a través de los puntos del reflector.	Comercialmente probados	10-300 MW	Para el funcionamiento óptimo se requiere una temperatura de 150-550°C.	Rankine de vapor Rankine orgánico	La planta tiene una eficiencia máxima de 14-20%	Anualmente la eficiencia neta es del 11-16%
El sistema está conformado por "helióstatos" cuya función es enfocar la luz solar en un receptor central; asimismo, el fluido de calor se mueve por el receptor generando vapor.	Empleado en proyectos comerciales piloto. Madurez media-alta.	10-200 MW	Para el funcionamiento óptimo se requiere una temperatura de 250-1200°C.	Ciclo de vapor Rankine Brayton	La planta tiene una eficiencia máxima de 23%	Anualmente la eficiencia neta es del 7-20%
La tecnología se encuentra compuesta por un conjunto de espejos lineales enfocando los rayos solares hacia un receptor de línea. El receptor fijo se encuentra ubicado en una torre.	Madurez media empleado en proyectos piloto	10-200 MW	Para el funcionamiento óptimo se requiere una temperatura de 150-500°C.	Rankine de vapor Rankine orgánico	La planta tiene una eficiencia máxima de 18%	Anualmente la eficiencia neta es del 13%
Conformado por una matriz de colectores de punto focal siguiendo la trayectoria del sol en dos ejes; así, los rayos solares son enfocados en un receptor en el "punto focal" del plato.	Baja madurez implementado en proyectos de demostración.	0,001-0,025 MW	Para el funcionamiento óptimo se requiere una temperatura de 300-1500°C	Motor Stirling Steam Rankine	La planta tiene una eficiencia máxima de 30%	Anualmente la eficiencia neta es del 12-25%

F-DC-125

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO  
DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO TECNOLÓGICO, MONOGRAFÍA,  
EMPREDIMIENTO Y SEMINARIO

VERSIÓN: 1.0

Agua	Se requiere 3 m3/MWh para refrigeración húmeda y 0,3 m3/MWh de agua seco	Se requiere 2-3 m3/MWh para refrigeración húmeda y 0,25 m3/MWh de agua seco	Se requiere 3 m3/MWh para refrigeración húmeda y 0,2 m3/MWh de agua seco	Se requiere 0,05-0,1 m3/MWh para lavado del espejo.
	Ocupación Larga. Debe tener una pendiente máxima del campo solar hasta el 2%. Se emplean fluidos como el agua/vapor y aceite sintético.	Ocupación Media. Debe tener una pendiente máxima hasta el 4%. Se emplean fluidos como el agua/vapor, aire y sal fundida.	Ocupación Media. Debe tener una pendiente máxima hasta el 4%. Se emplean fluidos como el vapor de agua	Ocupación Pequeña. Debe tener una pendiente máxima del 10% o más N/A
Tierra				
transferencia de calor				
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Posee sistemas de ciclo de vapor maduro.</li> <li>- Su diseño es simple facilitando que el seguimiento se realiza en un solo eje</li> <li>- La hibridación con gas natural es funcional.</li> <li>- Capacidad de conexión con almacenamiento térmico.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Genera altas temperaturas con una eficiencia térmica alta, presenta un seguimiento de doble ejes.</li> <li>- Presenta un índice alto de capacidad.</li> <li>- Tiene una red simple ya que su estructura es una torre única.</li> <li>- Los espejos planos son fáciles de construir, representando una ventaja económica.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cuenta con un sistema de ciclo de vapor entendido con un diseño simple, por lo cual es seguimiento se efectúa en un solo eje.</li> <li>- Es posible la hibridación con otros sistemas.</li> <li>- Contiene capacidad de conexión con almacenamiento térmico.</li> <li>- Los espejos planos son fáciles de construir, representando una ventaja económica.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Genera altas temperaturas con una eficiencia térmica alta, presenta un seguimiento de doble ejes.</li> <li>- Presenta una buena relación costos-beneficios en la producción de masa a comparación de las demás tecnologías.</li> <li>- No requiere una superficie nivelada.</li> </ul>

Desventajas

- |  |  |   |  |
|--|--|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>-Los volúmenes de agua puede representar una restricción del sitio en el que se construya.</li> <li>-La temperatura máxima es limitada.</li> <li>-La superficie debe adecuarse para la instalación de los canales.</li> <li>-El seguimiento del sol es limitado para los sistemas de un solo eje.</li> <li>-Los espejos curvos requieren de una mayor inversión.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Los volúmenes de agua puede representar una restricción del sitio en el que se construya.</li> <li>-Requiere de una gran inversión.</li> <li>- Las unidades con un gran tamaño son las más rentable.</li> <li>- El seguimiento del sol representa un trabajo complejo</li> <li>-La superficie debe condicionarse.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Los volúmenes de agua puede representar una restricción del sitio en el que se construya.</li> <li>- El seguimiento del sol es limitado para los sistemas de un solo eje.</li> <li>-La superficie debe adecuarse para la instalación de los canales.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Requiere de una inversión inicial alta.</li> <li>-La elaboración del plato parabólico requiere de altos costos.</li> <li>-Los costos de operación y mantenimiento pueden ser alto.</li> <li>-El almacenamiento termino no es posible</li> <li>-La rugosidad de la superficie representa una limitación.</li> </ul> |
|--|--|---|--|

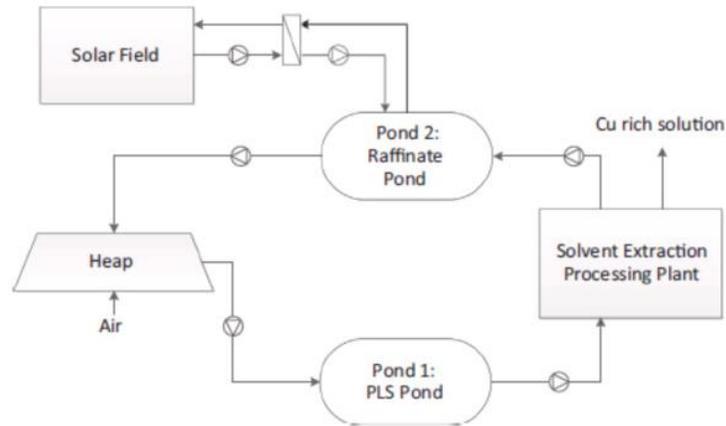
---

Fuente: Baig, Surovtseva, & Halawa (2015).

Zurita et al (2018) argumenta que la eficiencia de los colectores de placa plana típicos (FCP) varía entre 0,72-0,75 mientras que los colectores de tubos evacuados-ETCs tienen un mejor desempeño que la tecnología FCP en climas fríos con una eficiencia entre 0,62-0,82. Por otro lado los colectores parabólicos compuestos-CPC tienen un sistema más simple que los colectores cilindroparabólicos.

Murray, Platzer y Petersen (2017) plantea que la integración de la energía solar térmica se emplea en procesos de electroobtención, electrorrefinación y en procesos de lixiviación para calentar la solución; empleándose colectores solares de baja temperatura sin modificar el proceso de la minería. Según los autores, estas inserciones de la energía termosolar aumenta las tasas de extracción del metal planteando un diseño de biolixiviación que consta de dos estanques y el campo de colectores solares térmicos (ver Tabla 4) con una efectividad de extracción de cobre del 85% para una relación de 1:1 y una tasa de flujo de solución de 10 kg/hm<sup>2</sup>

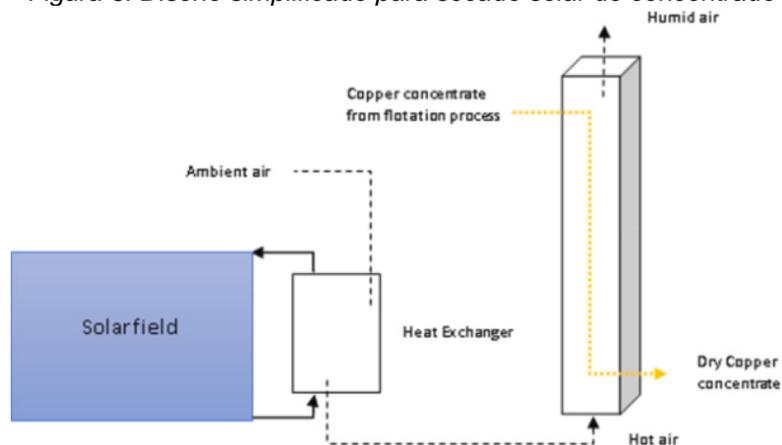
Figura 5. Un diseño simplificado de biolixiviación en pilas asistida por energía solar térmica de calcopirita



Fuente: Murray et al (2017).

Para Behar, Flamant, Olalde, y Falcoz (2017) es sustentable emplear energía termosolar para el secado del concentrado del metal en operaciones que tenga una temperatura de secado de 180°C. La Figura 5 presenta un modelo para el secado de concentrado mediante un campo solar cilindroparábólico que calienta un fluido de transferencia de calor como el aceite o sal fundida generando aire caliente el cual es enviado a un secador de lecho fluidizado para secar el concentrado.

Figura 6. Diseño simplificado para secado solar de concentrado



Fuente: Behar, Flamant, Olalde, & Falcoz (2017)

### 5.3. Plantear por medio del parámetro LCoH el beneficio-costos de la implementación de la energía termosolar en la industria metalúrgica-minera.

Dado a que se consultó fuentes de información secundaria para el caso colombiano y no se encontró información suficiente que arrojaran estándares definidos en la industria metalúrgica-miera que permita determinar el parámetro LCoH arrojando la relación de costo-beneficio de la implementación de la energía termo solar, este objetivo documentara diferentes casos internacionales en los que se aplicó el parámetro, con el objetivo de brindar un mayor entendimiento sobre el uso del LCoH en la minería.

El LCoH conocido como "Levelized Cost of Heat" es un parámetro que se emplea en la comparación de los costos de producción de calor para diferentes fuentes de energía y sus tecnologías, (Sandoval, 2021). Este parámetro se calcula mediante la siguiente formula:

Figura 7. Formula para calcular el parámetro LCoH

$$LCOH = \frac{I_0 - S_0 + \sum_{t=1}^T \frac{C_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^T \frac{E_t}{(1+r)^t}}$$

Nota:

LCoH: Levelized Cost Of Heat en USD/kWh

$I_0$ : Inversión inicial de la tecnología en USD

$S_0$ : Subsidio e incentivos en USD

$C_t$ : Costos de operación y mantenimiento por año en USD

TR: Tasa de impuesto corporativa en %

$DEPt$ : Depreciación del activo por año en USD

RV: Valor residual en USD

$E_t$ : Ahorro de energía final o demanda de energía final por año satisfecha con esta tecnología en kWh. También se conoce como energía de referencia.

$r$ : Tasa de descuento en %

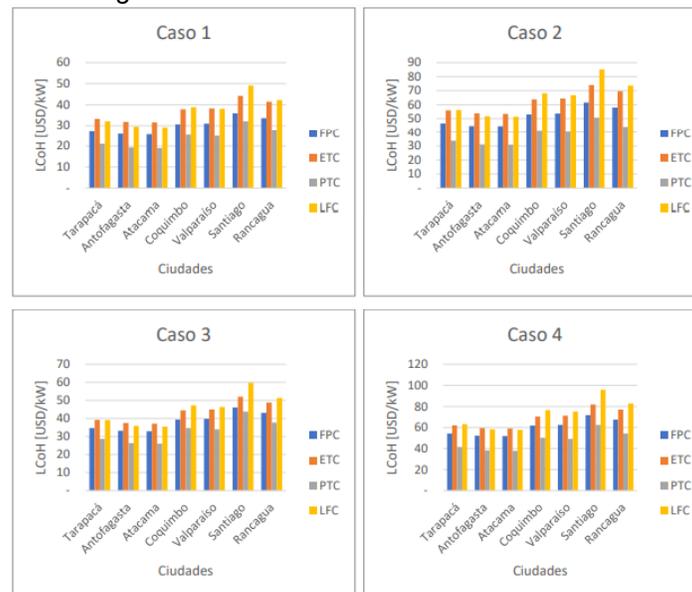
T: Periodo de vida útil de la central

El LCOH tiene como finalidad hallar el precio de venta del calor para hacer rentable el proyecto de energía renovable para una tasa de descuentos y períodos

determinado; en consecuencia, el LCOH se mira como el precio del combustible que será sustituido por las tecnologías que harían rentable la inversión por el ahorro que se genera, (Abal & Galione, 2015).

En base a lo anterior, Vásquez (2013) establece cuatro casos donde el primero corresponde a los costos de inversión mínimos de cada tecnología sin almacenamiento, el segundo considera los costos mínimos de inversión con sistemas de almacenamiento, el tercero analiza los costos elevados de inversión para tecnologías sin almacenamiento y finalmente el caso 4 contempla costos elevados de inversión para sistemas con almacenamiento (Ver Figura 8).

Figura 8. Resultados de los 4 casos de LCoH



Fuente: Sandoval (2021).

Sandoval (2021) comparo el LCoH del gas natural de Chile con un valor de 35,92 (USD/kWh) con las tecnologías de colectores cilindros parabólicos-PTC, colectores lineales de Fresnel-LFC, colectores de tubos de vacío-ETC y colectores de placa plana-FPC. Como resultado el autor establece que la tecnología que mejor tiene una relación costo-beneficio corresponde a la tecnología PTC para la industria

metalúrgica-minera debido a que tiene mejor eficiencia y bajos costos de adquisición.

Autores como Fuentes (2020), utiliza el costo nivelado del calor generado asistido por energía solar (LCOH ov fin) teniendo en cuenta el costo asociado al combustible dentro de los costos anuales del sistema sumado a los costos de operación y mantención; asimismo, el autor calcula la energía de referencia (Et) considerando la energía bruta empleado en el proceso de generación de vapor. Finalmente, como valores de costos para las tecnologías la Tabla 5 presenta los supuestos económicos para Chile.

**Tabla 5.**

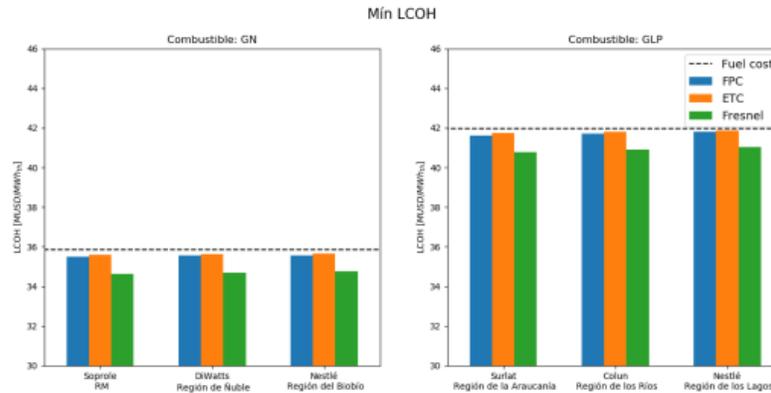
*Supuestos económicos considerados*

PARAMETRO	VALOR
Gas natural (USD/MWth)	35.85
Gas Licuado de Petróleo (USD/MWth)	41.96 - 44.39
Tasa de descuento	7 - 10 %
Período de evaluación	20 años
Rango de costo FPC (USD/m <sup>2</sup> )	150-500
Rango de costo ETC (USD/m <sup>2</sup> )	200-700
Rango de costo Fresnel (USD/m <sup>2</sup> )	150-800
Costo almacenamiento térmico (USD/m <sup>3</sup> )	2000
Costos de operación y mantenimiento	2 % · 10

Fuente: Fuentes (2020)

En base a lo anterior, el autor evalúa el parámetro LCoH para tres plantas en los cuales los colectores comparando tres tecnologías colectores Fresnel, colectores ETC y colectores FPC (ver Figura 9) en los cuales el LCoH que presenta una mejor relación costo-beneficio corresponde al colector Fresnel para todas las plantas, mientras que los colectores de tubos evacuados tienen una menor relación de LCOH.

Figura 9. Comparación de los valores de LCOH mínimos logrados en cada planta analizada



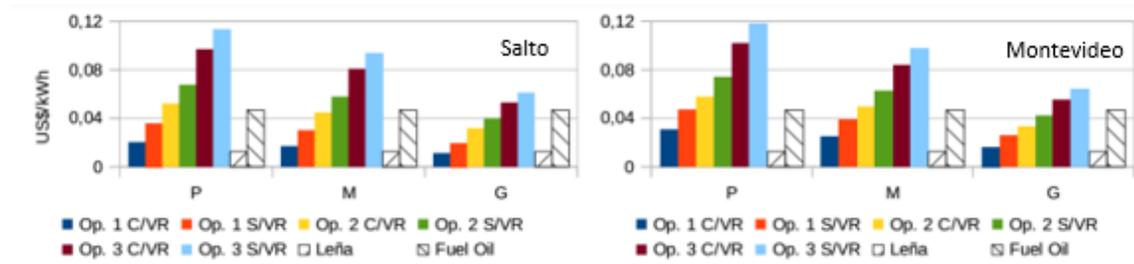
Fuente: Fuentes (2020)

Los autores Abal & Galione (2015), realizan el análisis del parámetro LCoH para dos localidades de Uruguay evaluando la generación de calor producto del aprovechamiento de la energía solar térmica en procesos de aumento de fluidos caloportador a vapores mediante colectores cilindroparabolicos-PTC elaborados por Nep Solar AG, colectores Fresnel-LFC fabricado por Industrial Solar teniendo en cuenta la exoneración de pagos de impuestos y beneficios fiscales aplicados a este país.

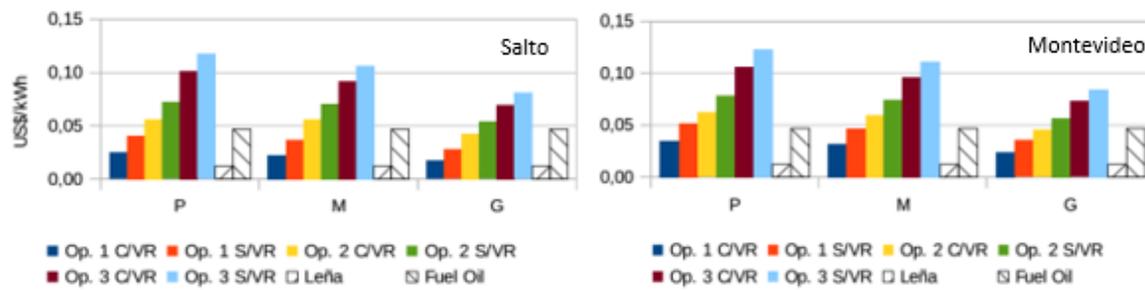
En base a lo anterior, la Figura 10 presenta los resultados del estudio LCOH donde los autores toman como parámetros una tasa de descuento del 12% para un período de 10 años para las localidades de Salto con 140°C y Montevideo con 140°C. Las letras P, M y G representan los tamaños del campo en el que se desarrollaran las tecnologías; finalmente, Op 1, 2 y 3 hacen referencia a las diferente opciones de exoneración del país equivalentes a sin valor residual(S/VR) y con valor residual (C/VR). Cabe decir que la comparación de las tecnologías se hizo para el remplazo de la Leña y el Fuel oil (combustible de vapor).

Figura 10. Análisis del LCoH para tecnologías LFT y PTC

LCOH para tecnologías LFT



LCOH para tecnologías PTC



Fuente: Abal & Galione (2015).

El análisis de las Figuras arroja que se llegan a valores menores de LCoH que el valor del Fuel Oil para pequeños y medio tamaño de campo teniendo a consideración el valor residual o no, para el tamaño grande de campo LFT sí se logra una competencia con el Fuel Oil para ambas localidades; por otro lado, LFT logra estar en menor precio del Fuel Oil aplicando la exoneración con valor residual acercándose a la leña y cuando el tamaño de campo incrementa. Para el caso de la tecnología PTC los valores de LCoH son mayores en todos los casos y en ningún caso es menor que el precio de la leña, (Abal & Galione, 2015).

En ese orden de ideas, el análisis de costo-beneficio destaca que la tecnología Fresnel presenta mejores resultados de retorno de inversión que la tecnología PTC, (Abal & Galione, 2015).

Azouzoute et al (2021), realizan un análisis de costos de producción térmica de concentradores solares aplicados en procesos industriales en seis localidades de marruecos utilizando tecnologías de reflectores Fresnel-LFR instalada en un área pequeña; para ello los autores aplican la siguiente fórmula propuesta por Kempener & Saygin (2014)

Ecuación 1. LCOH según Kempener & Saygin (2014)

$$LCoH = \frac{(Total\ installed\ project\ cost) \times FCR + (Annual\ O\&M)}{Annual\ thermal\ generation}$$

Fuente: Azouzoute et al (2021).

Donde FCR corresponde a la "tasa de cargo fijo" conocida como el ingreso por monto de inversión requerido para cubrir el costo de inversión; O&M anual hace referencia a los costos de operación y mantenimiento en dólares por kilovatio enmarcados en la cantidad de energía térmica generada por el sistema, (Azouzoute, y otros, 2021).

Como resultado los autores argumentan que entre los seis sitios seleccionados en Marruecos, Sudáfrica y Andasol en España los que obtuvieron una mejor producción fueron las localidades de marruecos ya que su producción térmica anual era mas productiva en comparación a Sudáfrica con una diferencia de rendimiento del 37%/año. En terminos de LCoH las locaciones de Sudafrica lograron una mejor relación costo-beneficio para Stellenbosch con el valor mas alto (4,02 USD/kWh) y el valor mas bajo para Zagora con 2,47 USD/kWh, (Azouzoute, y otros, 2021).

Ordóñez, Flores, & Soria (2021), evalúan el LCOH para un sistema LFC teniendo como parametros las características de la tecnología (el número de espejos, el ancho de espejos, la separación entre espejos, el ángulo trapezoidal y la altura del receptor), la ubicación, radiación solar y el tiempo de aplicación. Como resultados

los autores argumentan que el comportamiento energético del sistema es similar sin importar la latitud, el tiempo y la aplicación.

No obstante, factores como el ancho de los espejos afecta directamente el LCOH en un 10%, la altura del colector y el ancho del absorbedor causan variaciones en el LCOH en un 20%; finalmente, el ángulo y la altura del receptor no afecta al LCOH, (Ordóñez, Flores, & Soria, 2021). En concordancia con lo anterior, los autores emplean la siguiente ecuación:

Ecuación 2. LCOH según Ordóñez, Flores & Soria (2021)

$$LCoH = \frac{Y_a}{E_{annual, thermal}}$$

Fuente: Ordóñez, Flores, & Soria (2021).

Donde  $Y_a$  corresponde al costo total anualizado de la planta y  $E_{annual, thermal}$  es la energía térmica disponible anual en un contexto donde la energía no es almacenada ya que se utiliza inmediatamente.

#### **5.4. Sostenibilidad ambiental de la implementación de la energía termosolar en la industria metalúrgica-minera.**

Santos, Cabarcas, & Ospino (2020), argumentan que la energía termosolar es una tecnología viable ya que la fuente de este sistema es la radiación proveniente del sol cuya energía es abundante, inagotable y no contaminante; además, esta tecnología ha evolucionado hasta ser competitiva frente a otras fuentes convencionales. Por ende, la energía solar térmica es una alternativa que proporciona calor en procesos con entalpía en sectores productivos como por ejemplo las industrias metalúrgica-minera, considerándose como una tecnología ambientalmente viable.

La madurez técnica de las tecnologías termosolares tiene barreras en su implementación como la falta de información técnica, económica y beneficios sobre la viabilidad de emplear sistemas de almacenamiento como elemento clave para el uso de estas tecnologías en la minería de zonas donde se presentan gran cantidad de irradiación solar reduciendo la necesidad de almacenamiento a través de baterías (Gangazhe, 2017).

Es así, que el almacenamiento de la energía térmica combinado al sistema termosolar ofrece una ventaja en hacer que las tecnologías sean económicamente competitiva y confiable en su operación; por otro lado, se equilibra la oferta y la demanda de la energía al reducir los impactos de la intermitencia de la energía solar, (Achhari & Fadar, 2020).

En proyectos donde se requieran grandes cantidades de agua las tecnologías de concentración solar brindan una solución al emplear colectores solares cuya función es la de producir agua caliente reduciendo la utilización de combustibles fósiles en el proceso industrial, (Torres, 2020).

Votteler & Brent (2016), argumenta que la industria minera tiene poco conocimiento sobre las tecnologías de CSP y sus beneficios; además, los costos asociados a la construcción de los colectores y su mantenimiento hacen poco atractivos la inversión en tecnologías termosolares en la industria minera, (Nasirova & Agostinib, 2018). Otra barrera en estudios mineros, son las características geográficas de irradiación solar ya que el sistema requiere de ciertas condiciones específicas que la zona debe cumplir para garantizar una generación de energía solar óptima para garantizar una buena rentabilidad, rendimiento y una relación positiva del costo-beneficio (Addo, 2022).

Arraigado a lo anterior, en Colombia no se generan empleo a partir de la implementación de sistemas termosolares e incluso en Latinoamérica se encuentra escasa bibliografía sobre las tecnologías CSP salvo en países como Chile que cuenta con estudios más detallados; no obstante, internacionalmente la energía termosolar como el colector cilindro es una de las tecnologías más vanguardistas empleadas en los sectores productivos, (Santos, Cabarcas, & Ospino, 2020).

Desde un punto de vista ambiental, las tecnologías termosolares permite el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible-ODS como el ODS 7 (Energía asequible y no contaminante) y el ODS 13 (acción por el clima) al reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> emitido al medio ambiente, (Chang, Córdova, Moreno, & Wong, 2021). Addo (2022) plantea que la implementación de sistemas termosolares incrementa la visibilidad del potencial de la energía solar en países que se encuentran en la transición energética de fuentes renovables cumpliendo con la agenda global de descarbonización, así como para expandir el mercado y acceso de la energía en las industrias.

Achkari & Fadar (2020), argumentan que la energía termosolar y las tecnologías de concentración de energía solar son prometedoras en países que poseen un gran acceso a los recursos solares asegurando un suministro de energía óptimo el cual reduce la huella de carbono alcanzando las metas de descarbonización.

Por otro lado, la energía termosolar y sus tecnologías generan un impacto mínimo en el ambiente en la fase de fabricación de los equipos; no obstante, estas tecnologías no dejan huella ecológica cuando finaliza en periodo de la explotación, (De la Peña, Bordeth, Campo, & Murillo, 2018).

Desde una perspectiva financiera, los sistemas termosolares presentan costos altos, considerados como una tecnología de inversión riesgosas debido a que sus

tiempos de recuperación son largos siendo una tecnología económicamente no viable para minas que tengan una vida útil o incierta (Zharan & Bongaerts, 2017). Para Méndez (2017), estas tecnologías no son económicamente rentables en países latinoamericanos en aspectos reales como los precios actuales de venta de las tecnologías, impuestos y costos de inversión, operación y mantenimiento.

Para ello, autores como Singh, Gupta, Yadav, Singh, & Kumar (2022), establecen que para mejorar la viabilidad de las plantas de energía termosolar frente a otras opciones de generación de energía renovable se debe apostar por modelos híbridos de tecnologías termosolares con unidades de filtro y reguladores-LFR, integración de plantas CSP con energías convencionales reduciendo los costos de capital.

Estudios propuestos por Calderón (2020), establece que el implementar en reflector secundario en sistemas termosolares mitigan las pérdidas de la energía reduciendo el costo en la inversión de nuevos diseños; sin embargo, factores como el polvo, corrientes de aires afectan la captación solar.

## 6. CONCLUSIONES

Si bien la Energía termosolar representa una estrategia que se enmarca en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 7 y ODS 13) reduciendo las emisiones del CO<sub>2</sub> al medio ambiente, su implementación sigue siendo un reto para las industrias productivos y para el sector metalúrgico-minero en Colombia y a nivel Internacional. No obstante, países como Chile presenta un mayor avance en la inserción de las tecnologías de concentración y sin concentración en los procesos mineros en zonas que albergan gran cantidad de radiación solar.

En base a lo anterior, las tecnologías para desarrollar sistemas termosolar se enmarcan en la temperatura que requiera el proceso siendo las temperatura baja y media empleadas para procesos de uso domestico y temperaturas altas para procesos industriales destacándose los colectores solares cilindro parabólicos, sistemas Fresnel, sistemas de plato parabólico y sistemas de torre central.

Se concluye que no se encontró suficiente información para aplicar el parámetro LCoH en a la minería colombiana; no obstante, existen autores internacionales que plantean el beneficio-costos de la implementación de la energía termosolar en la industria metalúrgica-minera mediante el parámetro LCoH para diferentes tecnologías en procesos industriales y/o en la industria metalúrgica-minera destacándose el uso de tres ecuaciones de LCoH.

La energía termosolar es una tecnología que permite la disminución de los gases de efecto invernadero como el CO<sub>2</sub>, la cual es ambientalmente viable para su aplicación en industrias que generan grandes descargas de contaminantes al medio ambiente como la metalúrgica-minera; no obstante; en términos económicos esta tecnología no es viable ya que requiere de costos de inversión, operación y mantenimiento altos. Estrategias como la inserción de modelos híbridos con sistemas de CSP es una estrategia para reducir estos costos.

## 7. RECOMENDACIONES

- Para futuras investigaciones se recomienda el manejo de plataformas como Scopus con la finalidad de realizar un análisis más profundo sobre la inserción de tecnologías termosolar a nivel internacional. Asimismo, se recomienda la actualización de documentos referente a la temática, ya que las bases documentales encontradas corresponden a documentos con una ventana de tiempo mayor a cinco años.
- Se recomienda el análisis de las diferentes tecnologías de energía termosolar mediante parámetros meteorológicos con la finalidad de establecer una comparación de las limitaciones a las cuales se enfrentan estas tecnologías según las características físicas y horas pico-solar de la zona en las que se implementan.
- Se sugiere la profundización del parámetro LCoH aplicado en la minería debido a que para Colombia no se cuenta con información relevante que permita determinar la relación costo-beneficio del uso de energía termosolar en la industria minero-metalúrgica.
- Se sugiere realizar un comparativo entre sistemas fotovoltaicos y sistemas termosolar aplicados en la industria metalúrgica-minera con el propósito de impulsar la implementación de las tecnologías termosolar y resaltar la sostenibilidad ambiental-económica de las mismas.

## 8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abal, G., & Galione, P. (2015). Evaluación del potencial de generación termoeléctrica por concentración solar en el Uruguay. Uruguay: Universidad de la República Uruguay.
- Achkari, O., & Fadar, A. (2020). Últimos desarrollos en tecnologías TES y CSP: cuestiones energéticas y medioambientales, aplicaciones y tendencias de investigación. *Applied Thermal Engineering*, 167. doi:<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114806>
- Addo, M. (2022). Potencial tecnoeconómico óptimo y evaluación del sitio para sistemas solares fotovoltaicos y CSP en Ghana. Un enfoque multicriterio AHP geoespacial. *Enfoque de energía renovable*, 41, 216-229. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ref.2022.03.007>
- Azouzoute, A., El Ydriss, M., Elmaazouzi, Z., Benhaddou, M., Salihi, M., Hajjaj, C., & Garoum, M. (2021). Análisis de costos de producción térmica y calor del potencial de los concentradores solares para aplicaciones de procesos industriales: un estudio de caso en seis sitios en Marruecos. *Científico africano*, 12, 1-10. doi:<https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2021.e00765>
- Baig, M., Surovtseva, D., & Halawa, E. (2015). The Potential of Concentrated Solar Power for Remote Mine Sites in the Northern Territory, Australia. *Revista de energía solar*, 2015, 1-11. doi:<https://doi.org/10.1155/2015/617356>
- Ballesteros, H., & Aristizabal, G. (2007). Información técnica sobre gases de efecto invernadero y el cambio climático. Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM.
- Behar, O., Flamant, G., Olalde, G., & Falcoz, Q. (2017). Dimensionamiento de una termosolar para el proceso de secado de gránulos de hierro. PROMES-CNRS.

- Behar, O., Peña, S., Kouro, W., Fuentealba, E., Moran, L., & Sbarbaro, D. (2021). El uso de la energía solar en los procesos mineros del cobre: Una revisión integral. *Ingeniería y Tecnología*, 4, 1-13. doi:<https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100259>
- Benito, G., & Ruiz, K. (2018). Análisis beneficio-costo de la implementación de un sistema de energía solar fotovoltaica en el campus Aguas Claras de la Universidad Santo Tomás sede Villavicencio, Meta. Villavicencio: Universidad Santo Tomás.
- Calderón, J. (2020). Realizar un estudio Teórico de elementos de reflexión secundaria en concentradores lineales de radiación solar directa cilíndrico parabólicos y tipo espejo Fresnel. Bucaramanga: Unidades Tecnológicas de Santander.
- Carrera, L., Monteagudo, J., & Perdomo, N. (2021). La eficiencia energética y la competitividad empresarial en América del norte. *Revista Universidad y Sociedad*, 13(5), 479-489. Obtenido de <http://scielo.sld.cu/pdf/rus/v13n5/2218-3620-rus-13-05-479.pdf>
- Carrión-Chamba, W., Murillo-Torres, W., & Montero-Izquierdo, A. (2022). Una revisión de los últimos avances de los colectores solares térmicos aplicados en la industria. *Ingeniería Mecánica*(27), 59-73. doi:<https://doi.org/10.17163/ings.n27.2022.06>
- Cepssa, D. (2015). El Cambio Climático y los Gases de Efecto Invernadero (GEI) en Cepssa.
- Chang, L., Córdova, L., Moreno, A. D., & Wong, E. (2021). Proyecto LIDERA (Laboratorio de Investigación y Desarrollo de Energías Renovables- Aplicación COVID-19). *Diseño y Tecnología*, 8(3), 5-8. doi:<https://doi.org/10.26457/mclidi.v8i3.3217>
- Colín, A. (2022). Análisis exergético de la sustitución de un sistema de acondicionamiento de gas natural para la industrial petrolera por uno

aplicando energía solar. Toluca: Universidad Autónoma del Estado de México.

Cooperación Alemana. (2021). Implementación de fuentes no convencionales de energías renovables (FNCER) en el sector minero colombiano. Colombia: Cooperación Alemana.

De la Cruz, C. (2022). Configuración de un sistema colector solar de incidencia indirecta para generar energía térmica en condiciones climatológicas de Huancayo-Perú . Lima, Perú: Universidad Nacional Mayor de San Marcos .

De la Peña, Y., Bordeth, G., Campo, H., & Murillo, U. (2018). Energías limpias una oportunidad para salvar el Planeta. IJMSOR: International Journal of Management Science & Operation Research, 31(1), 21-25. Obtenido de <http://ijmsoridi.com/index.php/ijmsor/article/view/91>

Dellicompagni, P., Franco, J., & Flexor, V. (2021). Reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> mediante la integración de energía solar de concentración en la minería de litio. Energy Fuels, 35(19), 15879-15893. doi:<https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.1c01951>

Echeverri, M., Navas, S., & Suárez, M. (02 de Noviembre de 2021). Universidad EAFIT. Obtenido de Producción del sector minero colombiano: <https://www.eafit.edu.co/escuelas/economiayfinanzas/noticias-eventos/Paginas/produccion-del-sector-minero-colombiano.aspx>

ElColombiano. (21 de Julio de 2022). Las cuatro petroleras que apuestan por las energías renovables. Obtenido de <https://www.elcolombiano.com/negocios/las-cuatro-petroleras-que-apuestan-por-las-energias-renovables-KK18121803>

Evangelisti, L., De Lieto, R., & Asdrubali, F. (2019). Últimos avances en colectores solares térmicos: una revisión exhaustiva. Revisiones de energía renovable y sostenible, 114, 109318. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109318>

Farjana, Shahjadi, Huda, Nazmul, Mahmud, M., & Lang, C. (2019). Evaluación del ciclo de vida de los procesos mineros solares integrados: un futuro

- sostenible. Revista de producción más limpia, 236.  
doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117610>
- Fernández, M. (16 de Marzo de 2021). ¿Qué es Consumo Energético? Obtenido de <https://www.dexma.com/es/blog-es/que-es-consumo-energetico/>
- Ferrari, L. (2013). Energías fósiles: diagnóstico, perspectivas e implicaciones económicas. Revista Mexicana de Física, 59(2), 36-43. Obtenido de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57030971005>
- Fuentes, F. (2020). Evaluación energética para integración de energía solar térmica en procesos de la industria Láctea. Santiago de Chile: Universidad de Chile.
- Gangazhe, T. (2017). Obstáculos para una mayor adopción de energía renovable por parte de la minería Empresas en Sudáfrica. Sudáfrica: Universidad de Pretoria.
- Ghazouani, M., Bouya, M., & Benaissa, M. (2020). Análisis y optimización termoeconómicos y exergéticos de pequeños colectores PTC para la integración del calor solar en procesos industriales. Energía Renovable, 152, 984-998. doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.01.109>
- Giraldo, M., Ramírez, R., & Quintanilla, A. (2018). La energías alternativas ¿Una oportunidad para Colombia? Punto de vista(9), 1-13. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6540494>
- Infoenergía. (22 de Mayo de 2019). Soria Energía. Obtenido de ¿Qué es el consumo energético?: <https://soriaenergia.com/que-es-el-consumo-energetico/>
- Instituto Mexicano del Petróleo. (2018). Reporte de Inteligencia Tecnológica: Energía Termosolar. Mexico: Instituto Mexicano del Petróleo.
- INVESTOPEDIA. (04 de Julio de 2020). ¿Qué es el sector de los metales y la minería? Obtenido de <https://www.investopedia.com/ask/answers/040615/what-metals-and-mining-sector.asp>
- Mantilla, V. (2021). Valoración entre energías tradicionales y alternativas como fuente para el alumbrado público del barrio Urbanización Villa Sofía Municipio

- de Girón, en el marco del ODS 7: Energía asequible y No contaminante.  
Bucaramanga: Unidades Tecnológicas de Santander.
- Méndez, G. (2017). Estudio de centrales de energía termosolar y comparación con las instalaciones tradicionales de generación de energía eléctrica en Chile. Cataluña: Universitat Politècnica de Catalunya.
- Mondragón, F. (2021). Ciclos del dióxido de carbono en la formación y utilización de combustibles fósiles y su efecto en el cambio climático. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 45(176), 833-849. doi:<https://doi.org/10.18257/raccefyn.1364>
- Murray, C., Platzer, W., & Petersen, J. (2017). Potencial de la Energía solar térmica en la biolixiviación en pilas de calcopirita en la minería del cobre chilena. Ingeniería de Minerales, 100, 75-82. doi:<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2016.09.022>
- Nasirov, S., & Agostinib, C. (2018). Perspectivas de expertos en minería sobre los determinantes de la adopción de tecnologías solares en la industria minera chilena. Revisiones de energía renovable y sostenible, 95, 194-202. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.07.038>
- Nasirova, S., & Agostinib, C. (2018). Perspectivas de expertos en minería sobre los determinantes de la adopción de tecnologías solares en la industria minera chilena. Revisiones de energía renovable y sostenible, 95, 194-202. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.07.038>
- Opportimes. (17 de Enero de 2020). Australia lidera exportaciones de carbón bituminoso. Obtenido de <https://www.opportimes.com/australia-lidera-exportaciones-de-carbon-bituminoso/#:~:text=Por%20volumen%2C%20los%20dos%20productos,de%20minas%20a%20cielo%20abierto>
- Ordóñez, F., Flores, E., & Soria, R. (2021). Análisis exhaustivo de las variables que influyen en la optimización técnico-económica de los colectores Fresnel

- lineales de media temperatura. Informes de energía, 7, 5747-5761.  
doi:<https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.08.194>
- Ortega, H. (2018). Energía solar térmica para procesos industriales en Mexico, Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía. Mexico.
- Osornio-Cárdenas, J., Domínguez-Barreto, O., Miranda-Hernández, A., Reyes-Sandoval, A., & Vargas-Rosas, E. (2022). Energía Solar Térmica. TEPEXI Boletín Científico De La Escuela Superior Tepeji Del Río, 9(18), 41-43.  
doi:<https://doi.org/10.29057/estr.v9i18.8879>
- Pacto Mundial Red Española. (s.f). ODS13: Acción por el clima. Obtenido de <https://www.pactomundial.org/ods/13-accion-por-el-clima/>
- Parvez, M., & Morimot, T. (2018). Avances en la tecnología termosolar no concentradora de baja y media temperatura. Revisiones de energía renovable y sostenible, 82(3), 2066-2093.  
doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.030>
- PNUD, IDEAM, MADS, & DNP. (2015). Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (GEI) de Colombia. Bogotá D.C: PNUD, IDEAM, MADS, DNP.
- Ramos, P. (2004). Energías y medio ambiente. España: Edición Aquilafuente.
- Sandoval, M. (2021). Introducción de la energía solar térmica para reemplazar el uso de combustibles fósiles en procesos industriales en Chile. Santiago de Chile: Universidad de Chile.
- Santos, V., Cabarcas, C., & Ospino, A. (2020). Estudio de factibilidad de un sistema energético termosolar en la región caribe colombiana. Corporación Universidad de la Costa, 1-11. Obtenido de <https://hdl.handle.net/11323/6946>
- Serrano-Guzmán, M., Pérez-Ruiz, D., Galvis-Martínez, J., Rodríguez, M., & Correa, S. (2017). análisis prospectivo del uso de energía solar: Caso Colombia. Investigación y Ciencia, 25(71), 85-93. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/674/67452917011.pdf>
- Sharbaro, D., Behar, O., & Morán, L. (2021). ¿Cuál es la tecnología de energía solar más competitiva para la integración en las plantas mineras de cobre

- existentes: fotovoltaica (PV), energía solar de concentración (CSP) o híbrida PV-CSP? Revista de producción más limpia, 287. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125455>
- Sheldon, R. (2018). Métricas de Química Verde y Sostenibilidad: Pasado, Presente y Futuro. Sociedad Química Americana, 6(1), 32-48. doi:<https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b03505>
- Singh, S., Gupta, D., Yadav, P., Singh, S., & Kumar, A. (2022). Influencia de los parámetros del proceso en el costo de capital, la eficiencia de las plantas de energía solar basadas en CSP: una revisión. Materialstoday: Proceedings, 62, 123-130. doi:<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.606>
- Singla, J. (21 de Marzo de 2012). La energía de China. Obtenido de <https://www.caixabankresearch.com/es/energia-china>
- Tasbirul, M., Huda, N., Abdullah, A., & Saidur, R. (2018). Una revisión exhaustiva de las tecnologías de energía solar de concentración (CSP) de última generación: estado actual y tendencias de investigación. Revisiones de energía renovable y sostenible, 91, 987-1018. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.097>
- Torres, A. (2020). Energía termo solar por concentración parabólica para precalentar agua en el proceso de obtención de aceite esencial de limón. Lima, Perú: Universidad de Lima .
- TotalEnergies. (14 de Abril de 2021). ¿Qué es y cómo se mide el consumo energético? Obtenido de <https://www.totalenergies.es/es/pymes/blog/consumo-energetico>
- Upme, & Ecosimple. (2019). Guía para la incorporación de la dimensión minero energética en los planes de ordenamiento departamental. Bogotá D.C: Minergía.
- Valdez, M. (2020). La sustentabilidad como estrategia de desarrollo empresarial y competitivo de las pymes: Buenas Prácticas Ambientales aplicadas a MAN y

- SER S.R.L . orientadas a la gestión de efluentes y/o aguas residuales industriales. Córdoba, Argentina: Universidad Empresarial siglo 21.
- Vásquez, J. (2013). Cogeneración solar: Integración entre minería y energía. Santiago de Chile: Universidad de Chile.
- Vega de Kuyper, J., & Ramírez, S. (2014). Fuentes de Energía, Renovables y No Renovables. Aplicaciones. México: Alfaomega Grupo Editor S.A.
- Votteler, R., & Brent, A. (2016). Una revisión de la literatura sobre el potencial de las fuentes de electricidad renovables para las operaciones mineras en Sudáfrica. *Journal of Energy in Southern Africa*, 27(2), 1-21. doi:<https://doi.org/10.17159/2413-3051/2016/v27i2a1337>
- Zharan, K., & Bongaerts, J. (2017). Toma de decisiones sobre la integración de energías renovables en la industria minera: análisis de casos de estudio, análisis de costos y análisis FODA. *Revista de Minería Sostenible*, 16(4), 162-170. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jsm.2017.11.004>
- Zurita, A., Castillejo-Cuberos, A., García, M., Mata-Torres, C., Simsek, Y., García, R., . . . Escobar, R. (2018). Estado del arte y perspectivas futuras para el desarrollo de energía solar fotovoltaica en Chile. *Revisiones de energía renovable y sostenible*, 92, 701-727. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.096>