

Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de las Tecnologías
Industriales

Análisis de ciclo de vida de plantas de potencia con
ciclo de Rankine: comparativa entre planta
termosolar y planta de carbón

Autor: Alexis Javier Graciani García

Tutores: Gonzalo Sánchez Martínez y
José Fernando Vidal Barrero

Dpto. de Ingeniería Energética
Dpto. de Ingeniería Química y Ambiental
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2023



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

Análisis de ciclo de vida de plantas de potencia con ciclo de Rankine: comparativa entre planta termosolar y planta de carbón

Autor:

Alexis Javier Graciani García

Tutor:

Gonzalo Sánchez Martínez

José Fernando Vidal Barrero

Dpto. de Ingeniería Energética
Dpto. de Ingeniería Química y Ambiental
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2023

Trabajo Fin de Grado: Análisis de ciclo de vida de plantas de potencia con ciclo de Rankine: comparativa entre planta termosolar y planta de carbón

Autor: Alexis Javier Graciani García

Tutor: Gonzalo Sánchez Martínez y
José Fernando Vidal Barrero

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2023

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis maestros

Agradecimientos

En primer lugar me gustaría agradecer a mis padres, Inmaculada y Miguel, que tanto se han esforzado en darme una educación y conjunto de valores con tanta dedicación y cariño, así como pagarme con paciencia cada matrícula y con todavía más paciencia apoyarme en las pendientes más inclinadas de la carrera. A mi hermano, abuelos y familia que han aportado su grano de arena en la formación de mi carácter y especialmente a mi prima María Ángeles y mi tío Paco pues su ejemplo y consejos me encaminaron a esta bonita profesión. A Humberto y Andrés, y al resto de mis compañeros que pasamos tantas horas en la ETSI, al resto de mis amigos y especialmente a Carmen, que me vieron entrar en esta escuela y hoy salir como ingeniero.

Alexis Graciani García

Resumen

Un análisis de ciclo de vida de la tecnología termosolar frente a otro de la tecnología de planta térmica de carbón permite comparar los impactos ambientales de ambas plantas a lo largo de su vida útil, siendo superiores los de la planta no renovable de carbón pero sin ser despreciables los de la planta termosolar. La información reunida en este trabajo de las características de ambas tecnologías y de los valores de las categorías de impactos de estas da idea de las consecuencias detrás de la electricidad que se consume y aporta argumentos al debate público respecto a la configuración del mix energético del país.

La metodología utilizada, estandarizada mediante las normas ISO 14040 y 14044, utiliza categorías de punto medio para valorar los impactos y un proceso iterativo para alcanzar los objetivos planteados. Para la obtención de las categorías de impactos a partir de los datos obtenidos se ha utilizado el programa SimaPro.

Abstract

A life cycle analysis (LCA) of the solar thermal technology compared to the coal-fired power production technology makes it possible to compare the environmental impacts of both plants throughout their service life, those of the non-renewable coal plant being higher but without being negligible those of the solar thermal plant. The information gathered in this work on the characteristics of both technologies and the values of their impact categories gives an idea of the consequences behind the electricity that is consumed and provides arguments to the public debate regarding the configuration of the country's energy grid.

The methodology used, standardized by the ISO 14040 and 14044 standards, uses midpoint categories to assess the impacts and an iterative process to achieve the objectives set. To obtain the categories of impacts from the data obtained, the SimaPro program has been used.

Índice

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xiv
Índice de Tablas	xvi
Índice de ilustraciones	xvii
Notación	xviii
1 Introducción	11
1.1 <i>Estado del Arte Tecnología Termosolar</i>	11
1.1.1 Situación en Andalucía.....	11
1.1.2 Situación en España	12
1.1.3 Situación en el Mundo	12
1.1.4 Conclusión.....	13
1.2 <i>Estado del Arte Energía basada en Carbón</i>	13
1.2.1 Situación en Andalucía.....	15
1.2.2 Situación en España	16
1.2.3 Situación en el Mundo	17
1.2.4 Conclusión.....	17
1.3 <i>Objetivo</i>	17
1.4 <i>Alcance</i>	18
1.4.1 Definición de los sistemas.....	18
1.5 <i>Metodología</i>	18
1.5.1 Categorías de Impactos Seleccionadas.....	19
1.5.2 Metodología de evaluación de impactos	20
1.5.3 Requisitos de Calidad de Datos	20
2 Análisis de Ciclo de Vida de Planta de Carbón	23
2.1 <i>Descripción del sistema</i>	23
2.2 <i>Suposiciones y limitaciones</i>	24
2.3 <i>Análisis de Inventario</i>	24
2.3.1 Recopilación de datos	24
2.3.2 Cálculo de datos	25
2.4 <i>Evaluación del impacto del ciclo de vida</i>	26
3 Análisis de Ciclo de Vida de Planta Termosolar	29
3.1 <i>Descripción del sistema</i>	29
3.2 <i>Suposiciones y limitaciones</i>	29
3.3 <i>Análisis de Inventario</i>	30
3.3.1 Recopilación de datos	30
3.3.2 Cálculo de datos	30
3.4 <i>Evaluación del impacto del ciclo de vida</i>	31
4 Comparación de Resultados	33
5 Conclusión	36
6 Anexo	38
<i>Anexo A: Modelos de Ciclos de Vida</i>	38
<i>Anexo B: Suma, Media y Mediana de Potencias</i>	40
<i>Anexo C: Orígenes de Impactos</i>	41

Referencias 43
Glosario..... 45

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Plantas termosolares en Andalucía.....	11
Tabla 2: Tipos de Carbón	14
Tabla 3: Matriz de Indicadores de Calidad del Dato (DQI)	21
Tabla 4: Agregación individual de DQI para obtener un DQI Total	21
Tabla 5: Impactos escogidos para Planta de Carbón	25
Tabla 6: Impactos referenciados a Unidad Funcional	26
Tabla 7: Producción de Energía de la CT los Barrios.....	27
Tabla 8: Categorías de Impacto de planta de carbón	27
Tabla 9: Impactos escogidos para la Planta Termosolar	30
Tabla 10: Factores de Potencia de Plantas Termosolares.....	31
Tabla 11: Impactos referenciados a la Unidad Funcional	31
Tabla 12: Categorías de Impactos de planta termosolar.....	32
Tabla 13: Comparación Total entre Planta de Carbón y Termosolar	33
Tabla 14: Comparativa de Impacto de Planta de carbón y Termosolar en etapa de producción.....	34
Tabla 15: Comparativa de Impacto de Planta de Carbón y Termosolar en etapa de construcción	35

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Antracita	14
Ilustración 2: Yacimientos Mineros en Andalucía	15
Ilustración 3: Yacimientos Carboníferos principales en España	16
Ilustración 4: C.T. Los Barrios.....	24
Ilustración 6: Planta Termosolar Palma del Río II.....	30

Notación

1,4-DCB	1,4-Dicloro Benceno
CFC11	Triclorofluorometano
GWh	Gigawatio por hora
kBq	Kilobecquerel
KJ/seg	Kilojulio por segundo
MW	Megavatio
NOx	Óxidos de nitrógeno
PM 2,5	Materia particulada de 2.5 micras

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Estado del Arte Tecnología Termosolar

El planeta Tierra recibe $1,7 \times 10^{14}$ kJ/seg del sol, una energía que puede ser aprovechada por el ser humano para obtener energía sin tener que depender de un combustible no renovable.

Las plantas de potencia termosolares utilizan la radiación solar reflejadas por espejos para calentar un fluido, cuando no directamente agua, que mediante un intercambiador aporta calor al vapor que alimenta la turbina generadora de potencia. Existe diferentes tipos de plantas en función del tipo de espejo y como estos concentran la radiación. Estas tecnologías son los canales parabólicos, la tecnología de torre central o de torre con campo de heliostato, las centrales de reflectores lineales Fresnel y por último los discos parabólicos con motor Stirling.

Las tres primeras tecnologías presentan instalaciones comerciales en funcionamiento desde hace décadas, mientras que la segunda aún se halla en un estado de desarrollo. Estas tecnologías surgieron un impulso hacia su madurez comercial durante los años 80 tras la Crisis del Petróleo, siendo la más abundante la de canales parabólicos.

1.1.1 Situación en Andalucía

Andalucía es un lugar privilegiado para la energía termosolar. De manera natural presenta estadísticas de irradiación solar que favorece la instalación de plantas solares. Así mismo durante los primeros pasos del desarrollo de la tecnología termosolar, fue elegida para instalar la primera instalación de España, CESA 1 (Central Termosolar de Almería) en el desierto de Tabernas, que surgió como un proyecto común del gobierno de España y la Agencia Internacional de la Energía. Años después obtuvo el hito de tener la primera instalación de torre central comercial del mundo, PS 10, construida por Abengoa. Esta compañía sevillana realiza proyectos EPC en todo el mundo hoy en día, así como otros servicios de ingeniería relacionados con este tipo de planta.

Hoy en día el 44% de la energía termosolar producida en España proviene de instalaciones en la comunidad andaluza, siendo Sevilla la provincia que más plantas de este tipo contiene, así como instalaciones experimentales Stirling. En términos cuantitativos suma 997,4 MW de potencia instalada repartida entre 24 plantas.

Tabla 1: Plantas termosolares en Andalucía

Centrales termosolares (30/06/2022)

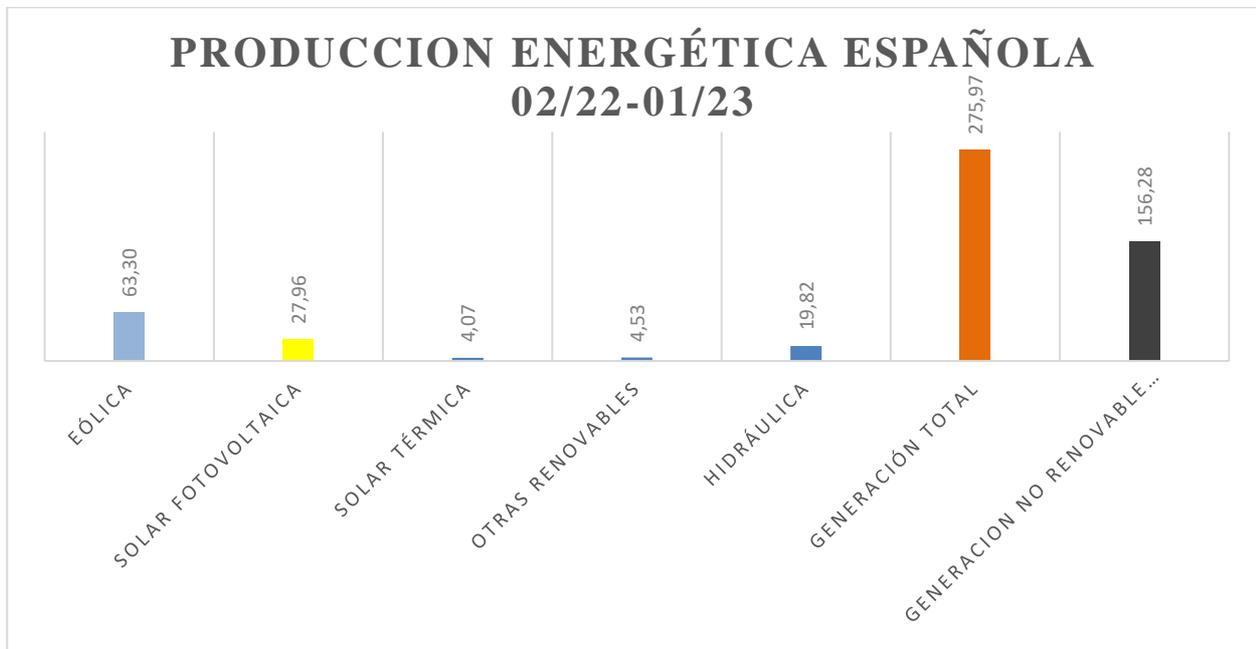
CENTRAL TERMOSOLAR	MUNICIPIO	PROVINCIA	POTENCIA (MW)
Valle 1	San José del Valle	Cádiz	50,00
Valle 2	San José del Valle	Cádiz	50,00
Palma Del Río I	Palma del Río	Córdoba	50,00
Palma Del Río II	Palma del Río	Córdoba	50,00
Soluz Guzmán	Palma del Río	Córdoba	49,90
La Africana	Fuente Palmera	Córdoba	49,90
Solacor I	El Carpio	Córdoba	50,00
Solacor II	El Carpio	Córdoba	50,00
Andasol I	Aldeire	Granada	49,90
Andasol II	Aldeire	Granada	49,90
Andasol III	Aldeire	Granada	49,90
Aznalcóllar Th Experimental	Aznalcóllar	Sevilla	0,08
Solnova Uno	Sanlúcar la Mayor	Sevilla	50,00
Solnova Tres	Sanlúcar la Mayor	Sevilla	50,00
Solnova Cuatro	Sanlúcar la Mayor	Sevilla	50,00
PS 10	Sanlúcar la Mayor	Sevilla	11,02
PS 20	Sanlúcar la Mayor	Sevilla	20,00
Disco Stirling Esi Experimental	Sevilla	Sevilla	0,01
Gema Solar Tres	Fuentes de Andalucía	Sevilla	17,00
Helioenergy 1	Écija	Sevilla	50,00
Helioenergy 2	Écija	Sevilla	50,00
Lebrija 1	Lebrija	Sevilla	49,99
Morón - Ibereólica	Morón de la Frontera	Sevilla	49,90
Los Arenales	Morón de la Frontera	Sevilla	49,90
TOTAL			997,40

Fuente: Agencia Andaluza de la Energía

1.1.2 Situación en España

En España, la energía termosolar se caracteriza por cuatro aspectos. En primer lugar, la concentración de las plantas en el sur peninsular, la inferioridad de esta tecnología en potencia instalada y producción frente a la fotovoltaica y la eólica y la explosión de esta tecnología durante la primera década del nuevo milenio.

Gráfico 1: Producción Energética Española 02/2022 a 01/2023



La primera característica se puede explicar en la mejor radiación solar y climatología que presenta frente a regiones más norteñas, lo que permite mejores resultados en producción y en rentabilidad. Esto favorece también la producción fotovoltaica, pero no explica la diferencia de potencia instalada entre ambas. Es la diferencia de coste inicial entre ambas tecnologías, y su diferencia de LCOE lo que incentiva a los inversores privados a primar los proyectos fotovoltaicos. Como se puede observar en el gráfico anterior, la energía producida en el año 2022 por la solar térmica apenas resulta el 1% de la generación total.

La tercera característica, la construcción de numerosas centrales durante la primera década del nuevo siglo, y la súbita reducción de construcción de nuevas está ligada al último aspecto de esta tecnología en España, que es la abundancia de centrales limitadas las potencias instaladas a 50 MW, en contraste con la potencia de otras fuentes o la potencias cada vez mayor de las plantas de la misma tecnología en el resto del mundo. Esto se debe al interés de las empresas propietarias a no superar dicha potencia por ser uno de los límites usados en el Real Decreto 661/2007 para separar grupos de instalaciones. Al estar por debajo de este límite, por ejemplo, no se está obligado a negociar la energía libremente en el mercado eléctrico y se puede entregar libremente a una empresa distribuidora, o es competencia de la comunidad autónoma dar la autorización administrativa para su construcción o cierre, entre otros. En España no se instalan nuevas centrales de torre desde 2011, frente al incremento de potencia instalada de otras renovables hasta hoy en día.

Actualmente en España hay 49 plantas en activo, sumando 2,3 GW en total. Industrialmente se reconoce en las empresas españolas la capacidad de realizar proyectos EPC y gestión de esta tecnología, llevando a cabo proyectos en todo el mundo como Abengoa en Cerro Dominador (Chile) o Inercio en Brasil.

1.1.3 Situación en el Mundo

El incremento de los costes de los combustibles fósiles, una mayor conciencia respecto al calentamiento global y las dificultades de suministro de combustibles por cambios geopolíticos llevan incentivando el incremento de la producción renovable en todos los países. En esta corriente la tecnología termosolar sigue creciendo, con un *know-how* cada vez más establecido, lo que permite mejores rendimientos, plantas de mayor potencia y

sistemas de almacenamiento que permiten suministrar energía más allá del anochecer.

De las , de las 115 plantas en operación para julio de 2022, 51 plantas estaban en suelo hispano, frente 14 chinas y 10 estadounidenses. Sin embargo, son China y los Emiratos Árabes quienes lideran la construcción de nuevas plantas. Es notable mencionar la inversión que se realiza en esta tecnología en países árabes, como Marruecos con 5 plantas en funcionamiento y expandiendo su potencia instalada con la instalación de Ouzarzate que con varias torres supera los 400 MW instalados, o Emiratos Árabes con una intención de diversificar el origen de su mix energético y hacerlo menos dependiente del petróleo, pese a las reservas que cuentan.

De las plantas examinadas que se encuentren en operación o construcción, el 23,4% superan los 50 MW, siendo construidas en su mayoría después del 2010, lo que permite observar el incremento de potencia con el tiempo, producto de la mejora de la tecnología. El subtipo de tecnología termosolar de potencia más abundante es el canal parabólico, con una presencia del 56% de plantas en operación o en construcción, frente a un 22.5% plantas de torre central. Es importante notar que de las 10 en construcción para 2022, 8 están diseñadas con un sistema de almacenamiento que supera las 8 horas, lo que les permitiría aventajar a otras renovables en horas de producción.

1.1.4 Conclusión

La tecnología termosolar es una tecnología con suficientes plantas en operación y la suficiente vida útil acumulada como para rechazar que sea una tecnología experimental, si bien aún permite desarrollo para mejorar su eficiencia y reducir costes. Es por ello por lo que numerosos países y empresas apuestan por esta tecnología, que permite suministrar potencia sin consumir combustible y con menor dependencia de las horas diurnas al poder tener almacenamiento térmico.

España, y Andalucía más concretamente, tiene el potencial geográfico y el *know-how* técnico para mantenerse como potencia en esta tecnología, y así reducir su dependencia energética del exterior. Sin embargo, la falta de apuesta durante la última década puede suponer un golpe para la industria local y permitir que otros países superen al país en el mercado internacional, como proyectistas o productores de estos equipos.

1.2 Estado del Arte Energía basada en Carbón

El carbón es una roca sedimentaria, de origen vegetal y usada principalmente para la producción energética. A partir de un proceso llamado carbonificación, materia vegetal proveniente de los árboles y helechos gigantes del Carbonífero queda enterrada y en un proceso anaeróbico con temperaturas que no superan los 250°, altas presiones geológicas y el paso del tiempo (hasta los 200 millones de años para la antracita), van perdiendo sus composiciones orgánicas originales con la eliminación del agua, hidrógeno, dióxido de carbono, metano (el temido grisú) y otros elementos de peso molecular bajo. De esta manera se obtiene una composición de sustancias orgánicas macromoleculares de densidad variable formada de largas cadenas de átomos de carbono con enlace simple y múltiples. Sus principales compuestos son por lo tanto carbón, agua, oxígeno, nitrógeno y pequeñas cantidades de azufre.

El tipo del carbón depende directamente de la antigüedad de su formación, pues a medida que aumenta el tiempo de carbonificación, más aumenta el porcentaje de carbono puro y menor es su humedad, en general aumenta la pureza. Esto se traduce en un mayor poder calorífico, pero también en una menor volatilidad. Visualmente en un carbón relativamente reciente aún se puede apreciar formas vegetales.

Tabla 2: Tipos de Carbón

Coal Types and Peat			Total Water Content (%)	Energy Content a.f.* (kJ/kg)	Volatiles d.a.f.** (%)	Vitrinite Reflection in oil (%)	
UNECE	USA (ASTM)	Germany (DIN)					
Peat	Peat	Torf					
Ortho-Lignite	Lignite	Weichbraunkohle	75	6,700			
Meta-Lignite		Mattbraunkohle	35	16,500		0.3	
Sub-bituminous Coal	Sub-bituminous Coal	Glanzbraunkohle	25	19,000		0.45	
Bituminous Coal		High Volatile Bituminous Coal	Flammkohle	10	25,000	45	0.65
	Gasflammkohle				40	0.75	
	Gaskohle				35	1.0	
	Medium Volatile Bituminous Coal	Fettkohle			36,000	28	1.2
		Low Volatile Bituminous Coal	Eßkohle			19	1.6
	Anthracite	Semi-Anthracite	Magerkohle			14	1.9
Anthracite		Anthrazit	3	36,000	10	2.2	

Como puede observarse en la tabla anterior, la clasificación de los tipos de carbón no está estandarizada y depende de cada país, pero pueden definirse los siguientes tipos principales:

- Turba: es el tipo de carbón que se forma en la primera etapa de la carbonificación. Es el que tiene menor cantidad proporcional de carbono y menor poder calorífico. Sin embargo, se usa también como combustible porque sigue teniendo más poder calorífico que la madera, aunque también se usa como abono. Se caracteriza por ser una masa de color pardo oscuro, terroso y donde aún se aprecia los componentes vegetales a partir de los que se formó.
- Lignito: el siguiente tipo de carbón en el proceso de carbonificación es un material leñoso, de color negro o pardusco oscuro y con gran cantidad de material volátil que se generó entorno a la edad Terciaria (1 a 45 millones de años).
- Carbón Bituminoso o Hullas: carbón de mayor calidad y poder calorífico entre 24 y 35 MJ/kg (aunque menor que la antracita), de color negro o marrón oscuro y relativamente duro, que se identifica por presentar bandas brillantes y bandas mates oscuras, y puede contener betún. A partir de la hulla se obtiene coque por destilación, en un proceso desarrollado por primera vez por Darby.
- Antracita: carbón duro, última etapa del proceso de carbonificación y por lo tanto que presenta la mayor cantidad de carbono, menor cantidad de material volátil y por lo tanto más difícil de encender pese a tener mayor poder calorífico. Tiene una estructura cristalina y de color negro brillante.

Ilustración 1: Antracita



El carbón ha sido usado como combustible desde la antigüedad siendo el carbón natural el origen mayoritario, pero fue durante la primera Revolución Industrial donde la invención de la máquina de vapor por James Watt para potenciar la industria emergente y el desarrollo de la siderúrgica aumentó exponencialmente la demanda de esta roca mineral. Con el desarrollo de la electrificación, las plantas térmicas de carbón han sido una

instalación clave en su despliegue y desarrollo, y desde el diseño y construcción en 1884 de la primera turbina de vapor por el ingeniero inglés Sir Parsons esta ha sido su tecnología fundamental para la producción de potencia eléctrica. Desde entonces la tecnología ha evolucionado, buscando primero la mejora de rendimientos por motivos económicos y el agotamiento de las primeras fuentes, y actualmente por la reducción de las emisiones contaminantes causantes del calentamiento global. Algunas tecnologías más conocidas aplicadas a las plantas de carbón son para mejorar el rendimiento y reducir emisiones son:

- Pulverización del carbón: el carbón es molido finamente y soplado en la zona de la llama de la caldera, logrando un mayor rendimiento de la combustión y consiguiendo las emisiones de monóxido de carbono.
- Filtro electrostático: equipo a la salida de gases de la chimenea que captura partículas y elementos contaminantes mediante la precipitación por ionización de estas partículas.

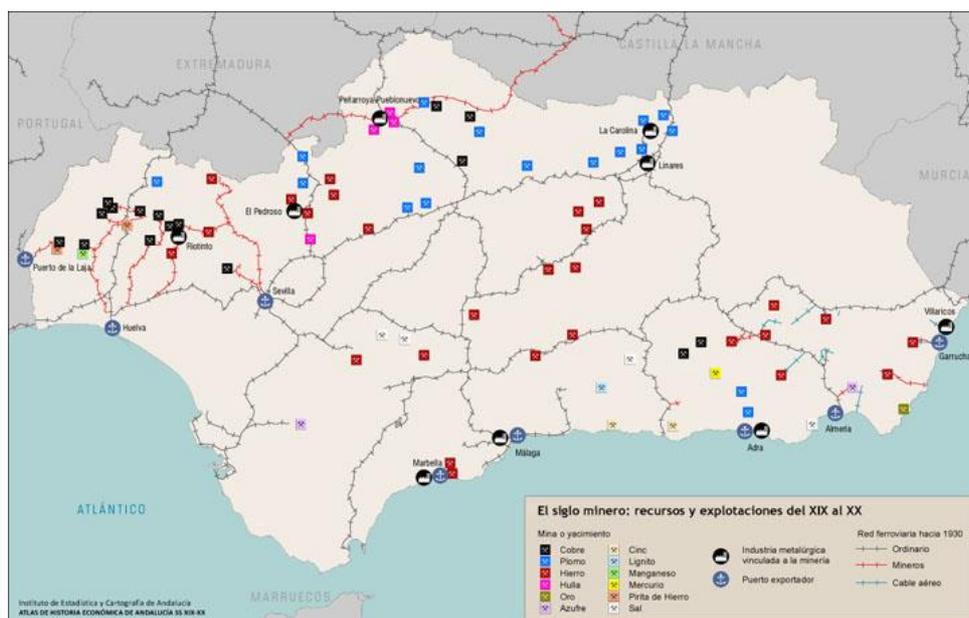
El carbón es un combustible de origen mineral cuya explotación se hace en minas, que se pueden dividir principalmente en dos tipos:

- Minas en superficie o a cielo abierto: se realiza excavando el terreno y retirando la tierra para acceder a las capas de carbón. Es más sencilla, barata y con mejor rendimiento que la minería subterránea al poder usarse máquinas mayores, y más segura al trabajar los mineros al aire libre y no en galerías. Pero por otro lado generan un mayor impacto y afecta más al terreno al generar grandes huecos que deben ser rellenados.
- Minas subterráneas: esos yacimientos se basan en túneles que se adentran en el terreno, al que se accede mediante pozos o galerías inclinadas. Se trata de un tipo de explotación más costosa y de menor rendimiento, debido a que las herramientas son más pequeñas para poder introducir las minas y se requiere transportar el carbón hacia el exterior de la mina mediante trenes de vagonetas o cintas transportadoras. Además el grisú, una mezcla de gases volátiles formado principalmente por metano, se desprende del carbón y representa un gran peligro por la posibilidad de explotar. Esto implica la necesidad de equipos de ventilación y maquinaria que no produzca chispas.

1.2.1 Situación en Andalucía

La extracción de carbón en Andalucía, si bien minoritaria respecto a otras regiones de España, puede ser trazada hasta varios milenios atrás. Además de su aplicación industrial hay numerosos ejemplos como los altos hornos de Málaga o el abastecimiento de combustible para la “Máquina de Fuego”, una máquina de vapor para extraer el agua de las minas de Almadén en el siglo XVIII. En Andalucía se encontraban yacimientos en la cuenca de Peñarroya-Belmez-Espiel (Córdoba) o en Villanueva del Río y Minas (Sevilla).

Ilustración 2: Yacimientos Mineros en Andalucía



En la comunidad autónoma representa un 5% de la potencia instalada (datos de diciembre de 2021), sufriendo una aceleración del cierre de centrales debido a los planes públicos de reducción de emisiones. Sin embargo, la crisis energética por el encarecimiento del gas ha provocado que estos planes queden en suspenso.

Esto sucede con la principal planta de la región, la CT Los Barrios, pues si bien se autorizó su cierre y desmantelamiento en 2020, retomó la actividad en febrero de 2022 siendo la única en activo. No han tenido la misma suerte otras plantas de Viesgo como la de Puente Nuevo, o la planta de Carboneras (Almería) que alcanzaba los 1.16 GW de potencia a partir de hulla importada.

1.2.2 Situación en España

Pese a tener una dependencia de combustibles extranjeros que ronda el 70% (Banco de España, 2022) y ser su única fuente autóctona significativa de combustible, el país cesó la extracción de carbón en 2018. Este sector sin embargo ha estado en una situación delicada desde sus orígenes, pues la mayoría son yacimientos de difícil extracción o con un mineral de baja calidad lo que implica una baja rentabilidad cuando no directamente supone pérdidas su actividad. Entre las razones de la crisis actual se encuentra la competencia de otras fuentes de energía como el gas y petróleo o las renovables en expansión, los impactos medioambientales (y más concretamente las emisiones contaminantes) que producen su extracción y uso, el ser un sector caracterizado por el tamaño pequeño de las explotaciones lo que dificulta la inversión, y la elevada siniestralidad y conflictividad laboral del sector. Esto unido a un plan de descarbonización tanto europeo como nacional, ha ido reduciendo el número de explotaciones abiertas hasta desaparecer.

Sin embargo en España hay datadas 4550 millones de toneladas, siendo accesibles 1187 millones según datos de la asociación del carbón europea EURACOAL (Eurocoal, 2018). Estas se encuentran en su mayoría en depósitos en el Principado de Asturias (carbón bituminosos y antracita), Puertollano (carbón bituminoso), en la provincia de Teruel (carbón subbituminoso) y yacimientos de lignito en Galicia.

Ilustración 3: Yacimientos Carboníferos principales en España



1.2.3 Situación en el Mundo

El carbón es la mayor fuente de energía y a la vez el mayor foco de emisiones atmosféricas de CO₂. Pero al mismo tiempo se trata de un combustible abundante (con reservas para más de 200 años) y muy repartido en el mundo, al que otros combustibles como el petróleo y el gas que se concentran en pocas áreas terrestres. Esto ha permitido al carbón mantener un precio bajo y estable, haciéndolo una fuente de energía muy atractiva para los países.

Las mayores reservas se encuentran en Estados Unidos, Rusia y China, sin embargo el despegue económico y productivo de China hace de este país el mayor extractor, pues este crecimiento económico va parejo de un incremento de la intensidad energética. No es la excepción en Asia, sino su mayor ejemplo, pues esta área geográfica basa su consumo energético en combustibles fósiles, llegando a un 77% de la combinación de carbón y gas en los países del ASEAN (Hon Chung Lau, 2023).

No se puede obviar la situación respecto al carbón en la UE, que sigue siendo una potencia económica con una población de 446 millones de habitantes (Eurostat, 2023) con un alto nivel de vida, lo que conlleva un algo alto consumo eléctrico. Si bien la Comisión Europea está embarcada en un proceso de descarbonización dentro de varios planes incluido el Green Plan, lo cierto es que el inicio de la guerra de Ucrania y la pérdida de las importaciones de combustibles fósiles desde Rusia ha supuesto una aceleración en la búsqueda de nuevas fuentes externas pero también la reapertura de minas de carbón autóctonas.

1.2.4 Conclusión

La producción energética de carbón es una industria compleja tanto por factores internos como externos, que presenta ventaja a las renovables en no depender de condiciones meteorológicas ni reservorios de energía, y ventaja a otras no renovables al depender de un combustible barato y distribuido. Pero los impactos asociados a su uso en emisiones contaminantes y el depender de minas que generan impacto en el terreno, frente a renovables más baratas que no contaminan la han señalado como la primera tecnología no renovable a extinguir, si bien condiciones políticas e internacionales parecen darle oxígeno a esta industria y evitar su desaparición

1.3 Objetivo

El siguiente trabajo de fin de grado parte del proyecto docente iniciado por la Universidad de Sevilla para la creación de una red internacional de trabajos de fin de estudios centrados en energías renovables y con formación integral en competencias STEM, y como tal pretende formar parte de un repositorio que recoja documentos relativos a dicha temática. El tema escogido pretende satisfacer mediante el estudio de impactos de dos tecnologías, una de fuente renovable como la tecnología termosolar y otra no renovable como la térmica de carbón, una serie de objetivos englobados en el desarrollo de las tecnologías renovables y el proceso de transición energética en el que se está embarcando la sociedad.

En primer lugar, el propio análisis de ciclo de vida comparativo de ambas tecnologías de producción de potencia, siendo la primera una tecnología renovable de menor potencia instalada que la fotovoltaica o eólica, que dispone de la capacidad de almacenamiento no redox, mientras que la segunda fue una fuente fundamental durante los siglos pasados, pero ha sido relegada por el ciclo combinado en España, si bien sigue siendo una de las fuentes principales en países como Alemania o China.

En segundo lugar, esta comparativa entre renovable y no renovable es importante en el proceso en el que se encuentra la sociedad de transición entre sistemas energéticos. Actualmente se está desarrollando un debate público sobre las tecnologías de potencia, en el que participan numerosos “*stakeholders*”, algunos de ellos sin una base técnica sobre la cual dar argumentos basados en criterios científicos. La aseveración comparativa extraída del estudio permite añadir argumentos objetivos al proceso, así como discernir caminos para esta transformación a través de las tecnologías que ofrece el mix energético. Además, establece un marco para contextualizar los impactos fruto de la producción energética de la que los ciudadanos y empresas obtienen la energía diaria.

Finalmente, estos impactos que se recogen en el inventario para la realización del análisis de ciclo de vida (ACV), son importantes pues son también examinados en las evaluaciones ambientales Este documento, de

obligada redacción para realizar un proyecto, es una herramienta habitual en el trabajo de los ingenieros y se espera que los impactos recogidos en este documento sean útiles para dicho trabajo.

1.4 Alcance

1.4.1 Definición de los sistemas

Los dos sistemas por estudiar son dos plantas de potencia cada cual tiene como fuente de energía primaria el sol en la termosolar y el carbón en la planta térmica clásica. Ambas tienen en común utilizar una turbina de vapor (Ciclo de Rankine) como bloque de potencia. El tipo de planta termosolar escogida es de canales parabólicos, por ser el tipo de central más abundante y tener un mayor tiempo de operación acumulado, y se utilizará como referencia la planta Palma del Río II, presente en la localidad del mismo nombre. Por otro lado, para el estudio de la planta térmica de carbón se va a utilizar como referencia la planta de Los Barrios (Cádiz), por ser un ejemplo cercano de planta en funcionamiento.

1.4.1.1 Función

La única función que se tomará en cuenta para ambas plantas será la generación de energía eléctrica para su suministro a red nacional. Se descarta otras funciones como la calefacción por distrito, poco usada en el país y que no es utilizada por las plantas de referencia de este estudio.

1.4.1.2 Unidad Funcional

Dado que ambas plantas tienen como función la generación de electricidad, se escoge 1 GWh de energía entregada a red como unidad funcional, para satisfacer el orden de magnitud de este tipo de planta.

1.4.1.3 Límites del sistema

Se va a realizar un estudio de ambas plantas recogiendo las etapas de construcción y operación, es decir, recorriendo toda la vida útil de operación de las plantas exceptuando la demolición. Esto último es debido a que la principal diferencia que afecta al objetivo es la que se produce durante la fase de operación por el diferente origen del calor aportado al sistema y la diferencia de ambas tecnologías en su situación actual, estando los planes de demolición de las plantas de carbón en suspenso por la actual crisis energética, y las plantas termosolares presentando pocos ejemplos de plantas clausuradas.

1.5 Metodología

El siguiente estudio va a seguir la metodología descrita en las normas ISO 14044 y ISO 14040, que describe el proceso para la realización de un análisis del ciclo de vida y su correspondiente estudio de impacto ambiental. Este procedimiento consta de cuatro fases, a saber, fase de definición del objetivo y alcance, de análisis de inventario, de evaluación de impacto ambiental y fase de interpretación.

En el anexo se encuentra una tabla de Excel con el inventario de impactos, sus valores y una valoración de la calidad de las fuentes de los que se han obtenido.

Para la tercera fase (y parte de la segunda) se ha utilizado el programa Simapro, pues mediante su base de datos y la propia herramienta de recopilación de impactos permite traducir las entradas y salidas de la naturaleza y la tecnosfera recogidas en categorías de impactos con unidades manejables. Sin embargo, como la propia norma explica, el ACV es un estudio iterativo en el que se va añadiendo y modificando los impactos que se analizan, mejorando la calidad de los resultados respecto al objetivo.

Los resultados obtenidos en esta última fase muestran los impactos en cada categoría en unidades de cada categoría, pero no se puede caer en la idea de que se pueden comparar entre categorías de esta manera. Por ello se mostrará también los resultados normalizados para poder hacer esta comparación y poder señalar aquellos impactos mayores entre las diferentes categorías.

Dado que solo hay un producto y no hay subproductos, no es necesario realizar un procedimiento de asignación de impactos, dado que todo se asigna a la energía producida.

1.5.1 Categorías de Impactos Seleccionadas

Mediante una metodología de evaluación, se calcula una serie de categorías de impactos mediante los impactos ambientales generados por el consumo de recursos y por las emisiones que se produce durante el ciclo de vida de la instalación. Estas categorías de impactos pueden definirse como tipos de impactos ambientales y llevan una unidad asignada.

Se empieza estudiando todas las categorías de impacto que ofrece Simapro y por tanto, se parte de las siguientes 18 categorías:

- Potencial de Calentamiento Global (kg CO₂ equivalente): aumento del efecto invernadero en la atmósfera terrestre, que conlleva un aumento de la temperatura global y un cambio climático. Principal preocupación actual respecto al medio ambiente (Ministerio de Asuntos Exteriores, Unión Europea y Cooperación).
- Reducción del ozono estratosférico (kg CFC11 eq.): reducción de la conocida como capa de ozono que reduce la radiación ultravioleta que llega a la superficie. Tiene un efecto global de daño a la salud humana y al ecosistema.
- Radiación Ionizante (kBq Co-60 equivalente): radiación con capacidad de dañar los seres vivos. Tiene un efecto principalmente local.
- Formación de Ozono, Salud Humana (kg NO_x eq.): al contrario que en altas capas de la atmósfera, el ozono troposférico resulta perjudicial para la vida humana. El NO₂ reacciona con el aire y el UV para generar ozono y NO, que a vuelve a reaccionar con el ambiente para generar compuestos orgánicos volátiles (COV). Efecto local
- Formación de partícula fina (kg PM 2.5 eq.): partículas en suspensión con capacidad de dañar la salud humana, reaccionar con otras sustancias en el ambiente para generar “smog” y acumularse en superficies y edificios. Tiene un efecto local y regional.
- Formación de Ozono, Ecosistema Terrestre (kg NO_x eq.): similar a la cuarta categoría de impacto, recogiendo esta vez el daño en el ecosistema
- Acidificación Terrestre (kg SO₂eq.): aumento del grado de acidez de la tierra y la lluvia, principalmente debido a la reacción de dióxido de azufre con agua para generar ácido sulfúrico. Efecto local y regional.
- Eutrofización del agua dulce (kg P eq.): proliferación excesiva de algas y fitoplancton debido al aporte incontrolado de nutrientes al agua, rompiendo el equilibrio del ecosistema marino al reducirse el oxígeno disuelto y la luz que llega a capas más bajas.
- Eutrofización marina (kg N eq.): similar al apartado anterior.
- Ecotoxicidad Terrestre (kg 1.4-DCB): aumento de la toxicidad dañina para los seres vivos. Su unidad de medida es el 1.4-dicloro benceno.
- Ecotoxicidad de agua dulce (kg 1.4-DCB): similar a la ecotoxicidad terrestre pero cuantificando su efecto en ambiente de agua dulce.
- Ecotoxicidad marina (kg 1.4-DCB): similar a la ecotoxicidad terrestre pero cuantificando su efecto en ambiente de agua marina.
- Toxicidad cancerígena en humanos (kg 1.4-DCB): aumento de la toxicidad dañina para los seres humanos, que produce en efecto final enfermedades cancerígenas y reducción de la esperanza de vida.
- Toxicidad no-cancerígena en humanos (kg 1.4-DCB): aumento de la toxicidad dañina para los seres humanos, que produce en efecto final enfermedades no cancerígenas y reducción de la esperanza de vida.
- Ocupación de terreno agrícola (m² eq.): terreno afectado que podría ser utilizado para la producción agrícola. Esta categoría no incluye únicamente el terreno ocupado por la planta y infraestructuras adyacentes, sino todo terreno impactado como puede ser por la extracción de recurso. Efecto local.
- Agotamiento de minerales (kg Cu eq.): reducción de las reservas de minerales.
- Agotamiento de combustible fósiles (kg combustible eq.): reducción de las reservas de combustibles fósiles.
- Consumo de agua (m³)

Durante la realización del siguiente estudio, se van a ir estudiando más o menos impactos en función de los resultados que se vayan obteniendo, de acuerdo con las directrices de la norma que marcan que los impactos que se estudien deben adecuarse al objetivo marcado y que el ACV es un proceso iterativo.

En una iteración final, se llega al siguiente criterio para escoger los impactos que se estudien en profundidad. En primer lugar, debido a que es el centro del debate público, se tratará con especial atención el calentamiento global. Otra categoría que se estudiará será aquel que represente el valor de impacto en cada ACV. Finalmente, son importantes nombrar aquellos impactos que dependen de características de las tecnologías de este estudio, y que por lo tanto permite hacer una aseveración comparativa entre las dos. Estos serán el uso de agua y terreno y el consumo de reservas de combustibles.

Este criterio sigue el criterio de aplicabilidad, uno de los criterios tomados por una comisión de la Unión Europea para la creación de una guía en la selección de metodología (Mark Goedkoop, 2016).

1.5.2 Metodología de evaluación de impactos

Las categorías de impactos recogidas en el apartado anterior se describen como de punto medio, pues se encuentran en un punto medio entre el origen (o causa) y la consecuencia final real. Aquellas categorías que cuantifican este daño final se conocen como categorías de impacto de punto final, y se suelen considerar tres indicadores *endpoint*: daño a la salud humana, daño al ecosistema y daño a la disponibilidad de recursos. Estas tres categorías finales se ven alimentadas de varias categorías intermedias, e igualmente estas categorías intermedias suman a varias consecuencias finales. Sin embargo, aunque las categorías de impacto final resultan más intuitivas se escoge utilizar un método de punto medio pues a medida que las categorías de impactos son más cercanas al efecto final son menos precisas y más controvertidas. Dado que el objetivo es aportar argumentos al debate público, es mejor aportar aquellos datos más precisos posibles y que no añadan ruido o polémica.

Por lo tanto al calcular las categorías de impactos en el programa Simapro, se escoge el método ReCiPe 2016 Midpoint (H) por tratarse de la versión por defecto.

1.5.3 Requisitos de Calidad de Datos

Para juzgar la calidad de los datos utilizados para alimentar el inventario de emisiones y recursos se va a utilizar el método propuesto por el Departamento de Ingeniería Química y Ambiental, que procede del manual de usuario del software CCalC2, un programa de cálculo de huella de carbono, desarrollado por la Universidad de Manchester.

Esta metodología utiliza cinco criterios para examinar los datos; la edad, el origen geográfico, la fuente de información, lo completos que estén y la consistencia. A estos criterios se le asignan un peso en función de cómo se valoren, y a los datos una puntuación en cada categoría. De esta manera se puede ponderar la calidad del dato de manera numérica.

Tabla 3: Matriz de Indicadores de Calidad del Dato (DQI)

Data quality criteria	Data quality indicators		
	High	Medium	Low
Age of data	< 5 years	5 - 10 years	> 10
Geographical origin of data	Specific	Partly specific	Generic/average
Source of data	Measured and/or modelled based on specific data (e.g. the company data or from suppliers)	Modelled using generic data from LCA databases; <u>some</u> data derived using expert knowledge	<u>Mainly</u> sourced from literature and/or estimated and/or derived using expert knowledge
Completeness of data	All inputs and outputs considered	Majority of relevant inputs and outputs considered	Some relevant inputs and outputs considered or known
Reproducibility /reliability/ consistency of data	Completely reproducible/reliable/ consistent	Partly reproducible/reliable/ consistent	Not reproducible/ not known

Tabla 4: Agregación individual de DQI para obtener un DQI Total

Data quality criteria	Weighting for each criterion on a scale 1-10*	High quality Max. score for each criterion: 3	Medium quality Max. score for each criterion: 2	Low quality Max. score for each criterion: 1	Example data quality assessment
Age	2	3	2	1	1 (Low)
Geographical origin	1	3	2	1	3 (High)
Source	3	3	2	1	2 (Medium)
Completeness	2	3	2	1	3 (High)
Reproducibility /reliability/ consistency	2	3	2	1	1 (Low)
Maximum score		30 (max score) Overall score for High in the range: 21-30	20 (max score) Overall score for Medium in the range: 11-20	10 (max score) Overall score for Low in the range: 1-10	19 (overall score) Data quality indicator: Medium

*The sum of all weights is 10.

Si se aplica este criterio a las fuentes de datos que se han utilizado para valorar los impactos se obtiene la siguiente tabla y cuantificación de la calidad (en paréntesis la puntuación de cada criterio):

Emisión	Referencia	Edad	Origen Geográfico	Fuente	Completeness	Reproducibile	DQI
Carbón	Por estequiometria a partir de CO2	-	-	Por estequiometria a partir de CO2 (1)	1	2	18
Agua Carbón	Datos de 2019, CT Los Barrios	2019 (3)	Andalucía (3)	Junta de Andalucía (3)	3	3	30
SO2	Datos de 2019, CT Los Barrios	2019 (3)	Andalucía (3)	Junta de Andalucía (3)	3	3	30
NOx	Datos de 2019, CT Los Barrios	2019 (3)	Andalucía (3)	Junta de Andalucía (3)	3	3	30
CO2	Datos de 2019, CT Los Barrios	2019 (3)	Andalucía (3)	Junta de Andalucía (3)	3	3	30
Partícula PM10	Datos de 2019, CT Los Barrios	2020 (3)	Andalucía (3)	Junta de Andalucía (3)	3	3	30
Agua Termosolar	Datos de 2019, Planta Termosolar Palma del Río I	2019 (3)	Andalucía (3)	Junta de Andalucía (3)	3	3	30

Si se le da peso a cada uno de estos datos en función de su importancia, siendo el carbón y el agua de la termosolar los de mayor peso (se ponderan un 100%), por ser el carbón el combustible de la planta y el agua de la termosolar la única entrada o emisión considerada en el carbón. Las emisiones del carbón se consideran de un nivel de peso inferior (se ponderan por 66%) y el insumo de agua de la planta de carbón la menos importante (y por lo tanto se pondera por 33% de su valor). Utilizando la formula suministrada por el manual:

$$ICD = \sum \text{peso} * \text{Puntuación} = 137.1$$

Comparando este resultado con el máximo de calidad (149.1) posible se observa que está en un rango medio-alto de calidad.

2 ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE PLANTA DE CARBÓN

El siguiente estudio va a seguir la metodología descrita en las normas ISO 14044 y ISO 14040, que describe el proceso para la realización de un análisis del ciclo de vida y su correspondiente estudio de impacto ambiental. Este procedimiento consta de cuatro fases, a saber, fase de definición del objetivo y alcance, de análisis de inventario, de evaluación de impacto ambiental y fase de interpretación.

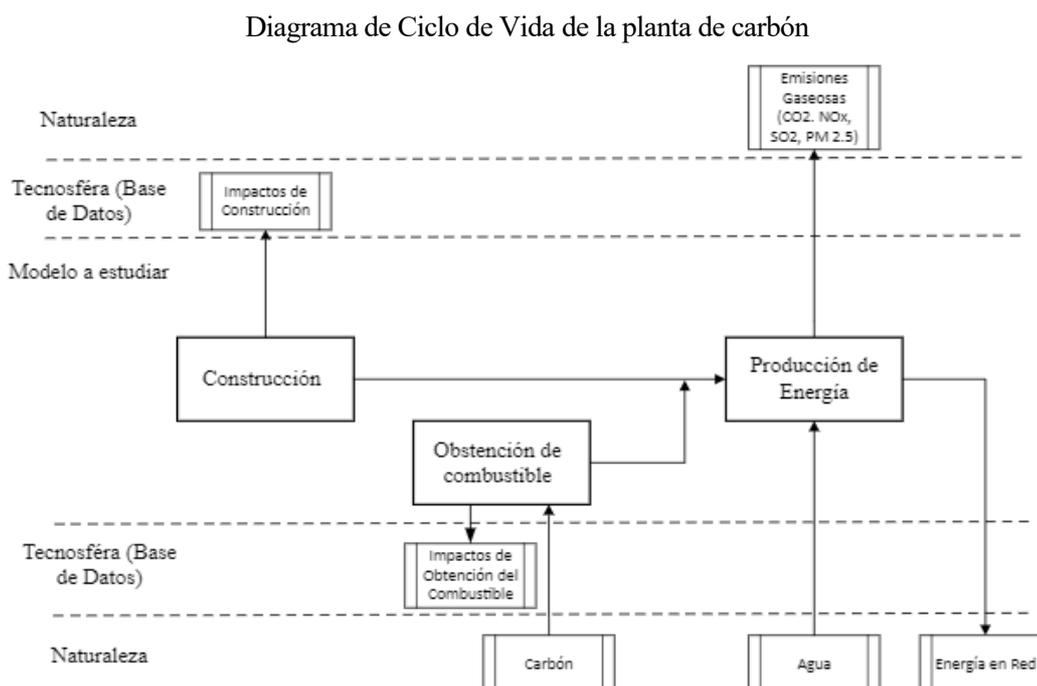
En el anexo se encuentra una tabla de Excel con el inventario de impactos, sus valores y una valoración de la calidad de las fuentes de los que se han obtenido.

Para la tercera fase (y parte de la segunda) se ha utilizado el programa Simapro, pues mediante su base de datos y la propia herramienta de recopilación de impactos permite traducir las entradas y salidas de la naturaleza y la tecnosfera recogidas en categorías de impactos con unidades manejables. Sin embargo, como la propia norma explica, el ACV es un estudio iterativo en el que se va añadiendo y modificando los impactos que se analizan, mejorando la calidad de los resultados respecto al objetivo.

2.1 Descripción del sistema

Una planta de potencia de carbón es una instalación que mediante la combustión del combustible se genera una energía térmica, que a través de un fluido caloportador es transportada a una turbina de vapor que generará el par para potenciar una máquina eléctrica que aporte a la red la potencia eléctrica buscada. Los equipos fundamentales de una planta de carbón son aquellos que realizan las principales etapas de un ciclo de Rankine: una caldera donde se aumente la temperatura y presión del fluido mediante el aporte de calor, una o varias turbinas para la producción de potencia al reducir la energía del fluido, un equipo de condensadores (por intercambio con aire, agua...) y un conjunto de bombas que recirculen a la adecuada presión el fluido condensado hasta el calderín de la caldera.

El ciclo de vida de esta planta a partir de las entradas y emisiones en diferentes etapas se puede representar mediante el siguiente diagrama:



2.2 Suposiciones y limitaciones

El carbón escogido es “Hard Coal” (carbón bituminoso) de origen indonesio exportado hasta Europa. El motivo de escoger este tipo de carbón es que la muestra que recoge el programa SimaPro únicamente es de Lignito y de carbón bituminoso. En España el carbón térmico que se consume para producir electricidad (principal función de este mineral en el país) se importa, pues en 2018 cesó la explotación de los yacimientos nacionales. De este carbón importado para uso en centrales térmicas, el mayor porcentaje corresponde a la suma de antracita y hulla bituminosa, siendo la subbituminosa un cuarto restante y las compras de lignito despreciables.

Por otro lado, los mayores importadores en porcentaje son Rusia e Indonesia para el año del estudio. Sin embargo, el primer origen de exportación se ha descartado porque debido a las sanciones internacionales implementadas hace un año, y el estancamiento de la guerra en Ucrania se puede aceptar que estas sanciones continuarán.

Una característica del lignito es la ausencia de un mercado internacional de su intercambio. Esto es debido a que poder calorífico es relativamente bajo respecto a los costes de su transporte, lo que no hace rentable su exportación. Es por eso que las importaciones de lignito que se nombran antes son despreciables y el hecho de que las plantas de carbón que utilizan este tipo de carbón se encuentren anexas a una mina de lignito, del que se abastecen.

Esta elección introduce una inexactitud en el problema, que si bien se considera asumible para el análisis cualitativo de las dos tecnologías.

2.3 Análisis de Inventario

2.3.1 Recopilación de datos

Para la obtención de datos en función de una referencia real se han utilizado los datos de emisiones de la Central Térmica de Los Barrios por tratarse de una central en funcionamiento cercana de la que se encuentran suficientes datos públicos, principalmente se usarán aquellos presentes en el Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes.

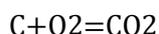
Ilustración 4: C.T. Los Barrios



Al estudiar la pestaña de emisiones se observa dos aspectos a simple vista; que se lleva un registro por años desde el 2017 hasta el 2020 (si bien en otras pestañas amplia la información hasta el 2022) y que el orden de magnitud de la masa de emisiones varía mucho entre diferentes sustancias contaminantes. En

primer lugar hay que estudiar la dimensión temporal, y en el apartado de información del complejo/instalación se puede ver información general como la serie cronología de principales contaminantes y la de horas de funcionamiento. En ambas se ve que hay una caída drástica en 2020, correspondiéndose con los planes de desmantelamiento, y como hay un nuevo pico en 2022. Se puede encontrar una explicación a ello en la crisis del COVID y la crisis energética tras la guerra de Ucrania. Por ello se escoge el año 2019 como año de estudio por considerarse un año de funcionamiento estándar sin las perturbaciones por las crisis antes nombradas. Por otro lado, en un proceso iterativo se van introduciendo en el inventario aquellas emisiones más abundantes, y se van descartando aquellas que por tienen un efecto despreciable, como ya se estableció en el apartado de limitaciones. Un ejemplo de esto es la inclusión del monóxido de carbono, cuya emisión fue de 22 toneladas para 2019, y sin embargo al calcular su impacto se ve que no varían los valores en las categorías de impacto al ser despreciable respecto al resto de entradas y salidas.

El único valor que no es extraído directamente de la fuente es el carbón, que es obtenido mediante estequiometría con el CO₂ y la ecuación química básica de la combustión, y aplicándosele un coeficiente para recoger la pureza media de tipo de carbón elegido para el estudio (85%).



De esta manera en primera iteración se escoge el agua captada de red, el carbón utilizado como combustible, los óxidos de nitrógeno, el dióxido de azufre, el dióxido de carbono y añadiéndosele en una segunda iteración la emisión de partícula fina como emisiones al aire. Otras emisiones son descartadas debido a que su orden de magnitud es muy inferior a estas emisiones escogidas, y que su impacto queda opacado por los impactos que ya se recogen.

En consecuencia se obtiene el siguiente inventario de flujos:

Tabla 5: Impactos escogidos para Planta de Carbón

Impacto	Valor
Carbón	197.590,7 ton/año
Agua	16-013 m ³ /año
SO ₂	308.7 ton/año
NO _x	401,3 ton/año
CO ₂	630.000 ton/año
Partícula	10.200 ton/año

Estos flujos se corresponden los dos primeros a entradas al sistema mientras que los cuatro finales son emisiones, siendo todos representativos del proceso de generación de potencia.

Para obtener las entradas correspondientes a la etapa de construcción se hace uso de la base de datos de impactos que contiene Simapro. Para ello se hace uso del producto recogido como “Hard Coal Power Plant, construcción 500W”. Hay que tener en cuenta que en este producto están incluidos los impactos por desecho del material tras desmantelar la planta.

2.3.2 Cálculo de datos

Una vez recogidos los consumos y emisiones estos deben ser todos referidos a la unidad funcional, es decir, la unidad de corriente debe estar referida por GWh. Para ello se va a utilizar la producción energética del mismo año del que se toman los datos (637 GWh), dado que son entradas y salidas anuales.

Tabla 6: Impactos referenciados a Unidad Funcional

Impacto	Valor
Carbón	310 ton/GWh
Agua	25 m ³ /GWh
SO ₂	0,485 ton/GWh
NO _x	0,63 ton/GWh
CO ₂	989,011 ton/GWh
Partícula	16,013 ton/GWh

Por otro lado los impactos de construcción de la planta están referidos a una planta de 500 MW, cuando la planta de referencia es de 570 MW. Por ello, utilizando una opción que ofrece Simapro, se va a escalar los impactos recogidos por el software a la potencia de referencia, suponiendo que escalan de manera lineal. Esta suposición se puede hacer dado que el coeficiente para escalar la potencia es cercano a la unidad, y por lo tanto el error si escalase de otra forma es pequeño.

Se puede comparar los valores que se obtienen con valores de otras fuentes para validar estos datos. Por ejemplo, a partir de los datos de Red Eléctrica, se puede comparar el impacto en CO₂ con las emisiones reales, que se obtiene al dividir las emisiones totales provenientes del carbón entre la energía total producida ese año de esa misma fuente. Se obtiene un valor de 977917 ton/GWh que es muy parecido al valor que se ha obtenido con las suposiciones que se han asumido.

2.4 Evaluación del impacto del ciclo de vida

Tras introducir estos valores en Simapro, a partir de la base de datos del programa que convierte los flujos brutos en valores de las categorías de impacto de punto medio, debido al método que se ha escogido. Estos a su vez pueden asignarse a las 3 etapas en la que se estudia el sistema, la construcción, la generación de energía y los impactos por la obtención del combustible.

Los impactos que se obtienen relativos a la construcción de la planta van a ser referidos a la unidad funcional, pero al tratarse de unos impactos que no se pueden imputar a un único año, se utilizará la producción de veinte años de funcionamiento, a partir de la mediana de producción real de estas dos últimas décadas. Esto se hace en primer lugar porque los impactos en la construcción deben de ser imputados a toda la vida útil de la planta, no a un único año. Sin embargo, para una planta de 35 años de funcionamiento se escogen los últimos 20 porque la propia planta ha ido incorporando nuevos equipos y expansiones que han aumentado la potencia y el rendimiento, de tal manera que utilizar las últimas dos décadas permiten suponer una planta más estable en sus especificaciones técnicas. Por otro lado 20 años es un periodo más cercano al tiempo de funcionamiento de las plantas termosolares actuales y por lo tanto permite una mejor comparación entre los dos casos. Se estudian tres medidas para referenciar los impactos, estos son la suma de los valores reales de energía producida los últimos 20 años, la media de estos valores por el tamaño de la muestra y finalmente la mediana de los estos valores por el tamaño de la muestra. Este estudio entre los tres valores se justifica en la búsqueda de un valor que represente de forma ajustada la producción de la planta pero sin que las variaciones de producción por motivos externos interfieran en los resultados, de tal manera que se puedan extrapolar los resultados a otras plantas. Esto se puede ver en los últimos 4 años de producción, donde la producción difiere mucho de otros años de funcionamiento real. Finalmente se escoge la mediana por ser el resultado que mejor se adapta a estos requerimientos, principalmente ser menos sensible a valores extremos, dando como resultado 64.157 GWh.

Tabla 7: Producción de Energía de la CT los Barrios

Año	Producción GWh
2021	0
2020	4
2019	690
2018	3.194
2017	3.334
2016	990,8
2015	1.705,3
2014	3.005,1
2013	2.923,8
2012	3.556,1
2011	2.341,1
2010	2.489
2009	3.221,7
2008	2.023,6
2007	4.228,1
2006	3.691
2005	3.989,2
2004	3.984
2003	3.548,9
2002	4.074
2001	4.018
2000	4.310

De estos procedimientos se obtienen los siguientes impactos en punto medio:

Tabla 8: Categorías de Impacto de planta de carbón

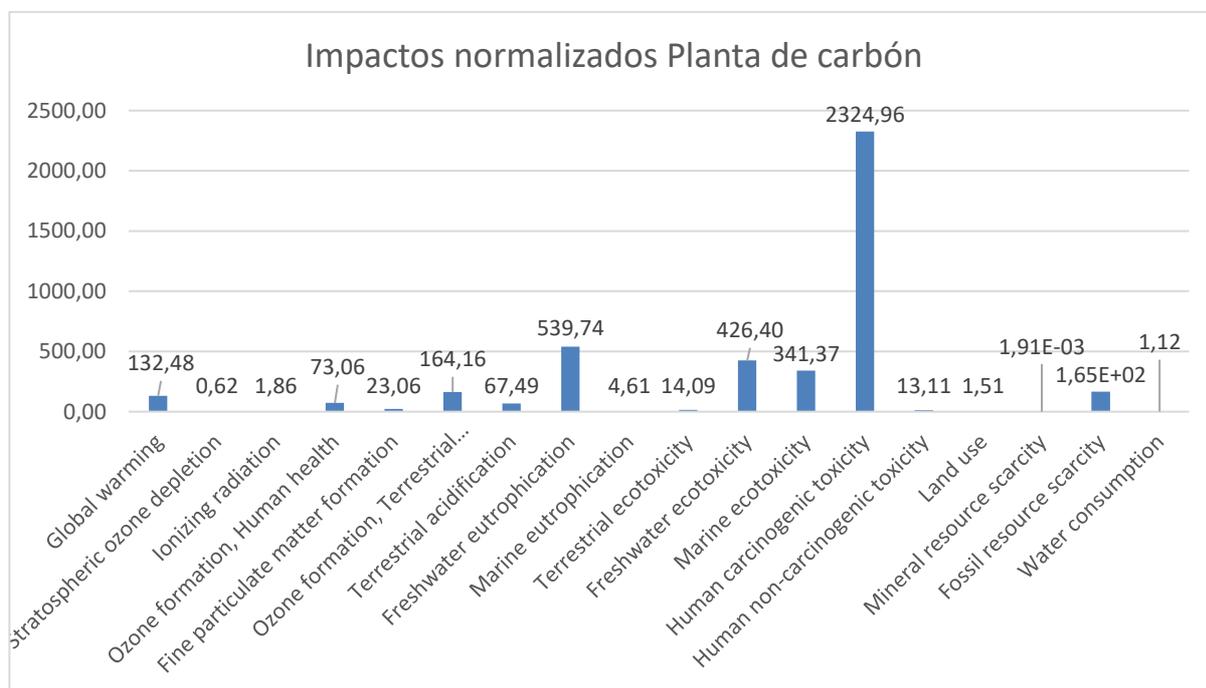
Categoría de impacto	Unidad	Total Ajustado	Obtención Energía	Obtención Carbón	Construcción Planta (Simapro)	Construcción Planta (Ajustada)	Energía %	Carbón %	Const. %
Global warming	kg CO2 eq	1,06E+06	9,89E+05	6,81E+04	1,73E+08	2692,94	93,32%	6,43%	0,25%
Stratospheric ozone depletion	kg CFC11 eq	0,04	0,00	0,04	49,37	0,00	0,00%	97,94%	2,06%
Ionizing radiation	kBq Co-60 eq	895,63	0,00	800,87	6,08E+06	94,77	0,00%	89,42%	10,58%
Ozone formation, Human health	kg NOx eq	1503,34	743,40	751,27	5,56E+05	8,67	49,45%	49,97%	0,58%
Fine particulate matter formation	kg PM2.5 eq	589,68	172,92	410,67	3,91E+05	6,09	29,32%	69,64%	1,03%
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	kg NOx eq	2915,88	2148,30	758,57	5,78E+05	9,00	73,68%	26,02%	0,31%
Terrestrial acidification	kg SO2 eq	2765,88	1963,60	789,68	8,08E+05	12,60	70,99%	28,55%	0,46%
Freshwater eutrophication	kg P eq	350,48	0,00	348,72	1,13E+05	1,75	0,00%	99,50%	0,50%
Marine eutrophication	kg N eq	21,27	0,00	21,17	5,83E+03	0,09	0,00%	99,57%	0,43%
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DCB	2,14E+05	0,00	1,69E+05	2,92E+09	4,55E+04	0,00%	78,76%	21,24%
Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DCB	1,07E+04	0,00	1,02E+04	3,56E+07	554,41	0,00%	94,84%	5,16%
Marine ecotoxicity	kg 1,4-DCB	1,48E+04	0,00	1,41E+04	4,66E+07	726,31	0,00%	95,11%	4,89%
Human carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	2,39E+04	0,00	2,22E+04	1,09E+08	1700,12	0,00%	92,90%	7,10%
Human non-carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	4,10E+05	0,00	4,02E+05	5,21E+08	8119,99	0,00%	98,02%	1,98%
Land use	m2a crop eq	9,35E+03	0,00	9222,27	7,94E+06	123,69	0,00%	98,68%	1,32%
Mineral resource scarcity	kg Cu eq	229,54	0,00	139,63	5,77E+06	89,91	0,00%	60,83%	39,17%
Fossil resource scarcity	kg oil eq	1,62E+05	0,00	1,61E+05	3,69E+07	575,87	0,00%	99,64%	0,36%
Water consumption	m3	299,00	25,00	248,44	1,64E+06	25,57	8,36%	83,09%	8,55%

En color amarillo aparecen marcada cada etapa con más peso por categoría de impacto (excepto en la categoría de formación de ozono, salud humana, en el que hay dos categorías prácticamente con el mismo peso). Se

puede observar que la etapa con más peso es la obtención del carbón, siendo despreciable los impactos de las otras dos etapas en algunas categorías como en la ecotoxicidad marina. Sin embargo en aquellas categorías relacionadas con las emisiones de gases contaminantes, como la acidificación (que provoca lluvia ácida) o la formación de ozono que afecte al ecosistema (relacionado en punto final con la formación de *smog*), y sobre todo el calentamiento global tienen un origen principal en la producción de potencia mediante la combustión de carbón en la planta. Esta distribución de orígenes mayoritarios en las fases de producción y obtención de combustible se puede explicar en el hecho de que estas dos etapas están sostenidas durante toda la vida útil de la planta, al contrario que la construcción que queda limitada a los primeros años del proyecto.

Al normalizar los valores de las categorías mediante la opción de la que dispone Simapro, se obtiene los siguientes valores comparables entre ellos:

Gráfica 1: Impactos Normalizados planta de carbón



Se observa que el mayor impacto no es el calentamiento global como podría pensarse a partir de la primera tabla de categorías de impactos, sino que esta categoría superior al resto es la toxicidad cancerígena en humanos. Especificando que se muestre los impactos normalizados por los procesos de los que provienen, se encuentra que esta contaminación es producto principalmente de la escoria de la minería del carbón.

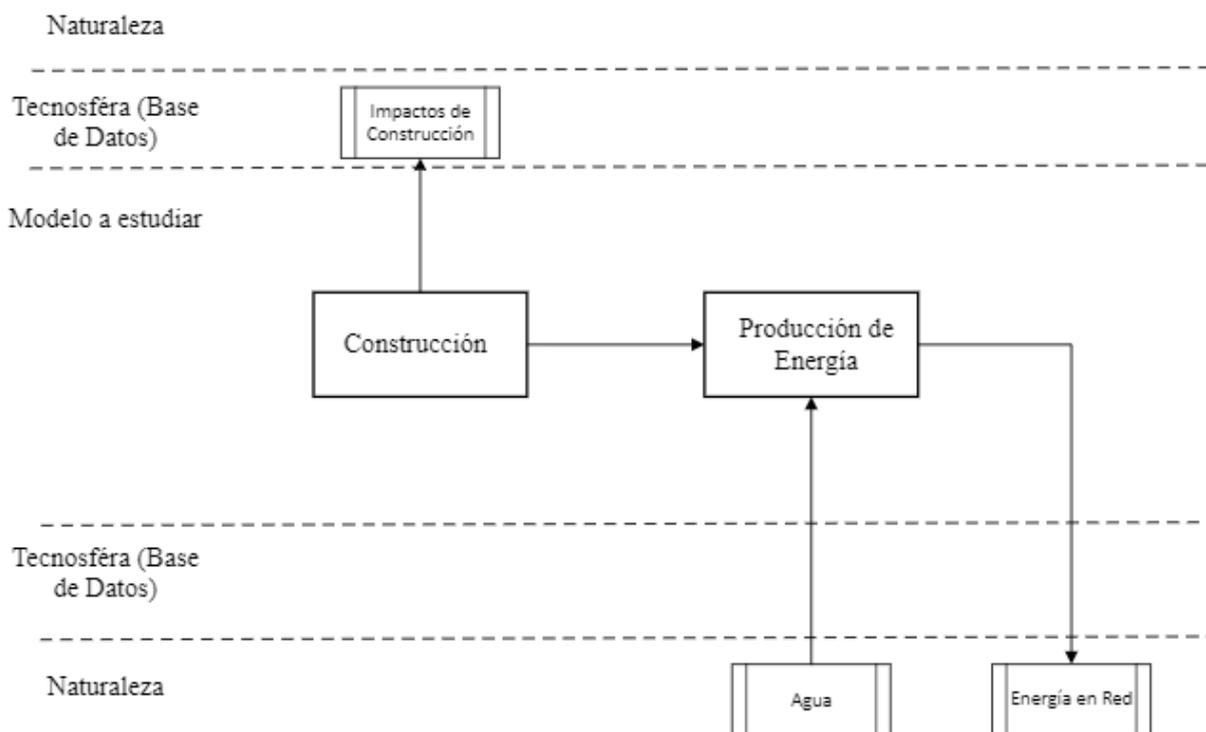
3 ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE PLANTA TERMOSOLAR

3.1 Descripción del sistema

Una planta de potencia termosolar es una instalación que utiliza la irradiancia solar reflejada a través de una serie de espejos sobre un conducto por el que circula un fluido caloportador, para trasportar la energía térmica de origen renovable hasta una turbina donde la pérdida de presión y temperatura generará un par que genere la energía eléctrica. El procedimiento es similar a la planta de carbón pues ambas están basadas en un ciclo de Rankine, siendo la principal diferencia el origen del calor aportado. Esta instalación puede contar con un sistema de almacenamiento térmico basado en una variedad de tecnologías (sales fundidas, almacenamiento de vapor...), de tal manera que pueda seguir aportando potencia si se nubla o incluso durante la noche.

El ciclo de vida de esta planta a partir de las entradas y emisiones en diferentes etapas se puede representar mediante el siguiente diagrama:

Diagrama de Ciclo de Vida de Planta de planta Termosolar



3.2 Suposiciones y limitaciones

De la planta solo se va a tomar los datos de consumo de agua. El primer motivo es porque las emisiones y consumos son despreciables frente a las cantidades de la planta de carbón, por lo cual de cara a analizar y comparar las emisiones con la finalidad establecida en el objetivo se pueden suponer despreciables. El segundo motivo es que la fuente recoge todas las emisiones establecidas por su protocolo, no aquellas que caractericen los impactos de la tecnología. Por ello aquel impacto que se escoja debe de ser representativo

de las plantas termosolares y ajustarse al objetivo planteado.

3.3 Análisis de Inventario

3.3.1 Recopilación de datos

Para la obtención de datos en función de una referencia real se han utilizado los datos de la Central Termosolar de Palma del Río I por tratarse de una central en funcionamiento cercana de la que se encuentran suficientes datos públicos, principalmente se usarán aquellos presentes en el Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes.

Ilustración 5: Planta Termosolar Palma del Río II



Al estudiar la pestaña de emisiones y consumos se observa que las emisiones son despreciables frente a las emisiones que produce la planta de carbón, excepto en el consumo de agua. Esta se supone toda de origen fluvial dado que la fuente de datos señala que proviene casi completamente de cauce superficial.

De esta manera se obtiene el siguiente inventario de flujo:

Tabla 9: Impactos escogidos para la Planta Termosolar

Impacto	Valor
Agua	537.488 m3/año

Este flujo constituye una entrada del sistema.

Para obtener las entradas correspondientes a la etapa de construcción se hace uso de la base de datos de impactos que contiene Simapro. Para ello se hace uso del producto recogido como “Concentrated solar power plant, solar thermal parabolic trough, 50 MW {ZA}| concentrated solar power plant construction, solar thermal parabolic trough, 50 MW | APOS, U”. Se escoge esta por ser una planta de igual potencia y e igual tipo de planta termosolar, de canales parabólicos. En el modelado de esta planta está incluido el desecho de acero y el desmantelamiento de la carretera.

3.3.2 Cálculo de datos

Una vez recogidos los consumos y emisiones estos deben ser todos referidos a la unidad funcional, es decir, la unidad de corriente debe estar referida por GWh. Para ello se va a suponer la producción energética anual a partir de la potencia de la planta y el factor de potencia medio de esta tecnología para

el año 2019, que se puede obtener a partir de los datos de Red Eléctrica Española. Esto se hace para poder comparar con los dos ACV en un mismo año de referencia.

$$Energía = \frac{50MW * 8760 \text{ horas} * 0.256}{10^3} = 112,128 \text{ GWh}$$

Tabla 10: Factores de Potencia de Plantas Termosolares

Año	Potencia (MW)	Producción GWh	Factor de Potencia
2018	2.304	4.424	21,9%
2019	2.304	5.166	25,6%
2020	2.304	4.538	22,5%
2021	2.304	4.706	23,3%
2022	2.304	4.123	20,4%

Se obtiene la siguiente entrada:

Tabla 11: Impactos referenciados a la Unidad Funcional

Impacto	Valor
Agua	4.793,5 m3/GWh

3.4 Evaluación del impacto del ciclo de vida

Tras introducir estos valores en Simapro, a partir de la base de datos del programa que convierte los flujos brutos en valores de las categorías de impacto de punto medio, debido al método que se ha escogido. Estos a su vez pueden asignarse a 2 etapas, una de construcción y otra de producción de potencia, pues al no necesitar combustible no se producen impactos por su extracción y transporte. Al igual que en el caso del ACV de la planta del carbón, los impactos de la planta termosolar se van a dividir entre la producción del ciclo de vida supuesto de 20 años, mediante una producción energética basada en la mediana de los factores de potencia (22.5%), pues el factor de potencia es más estable en la termosolar.

$$Energía = \frac{50MW * 8760 \text{ horas} * 0.225}{1000} * 20 = 1.971 \text{ GWh}$$

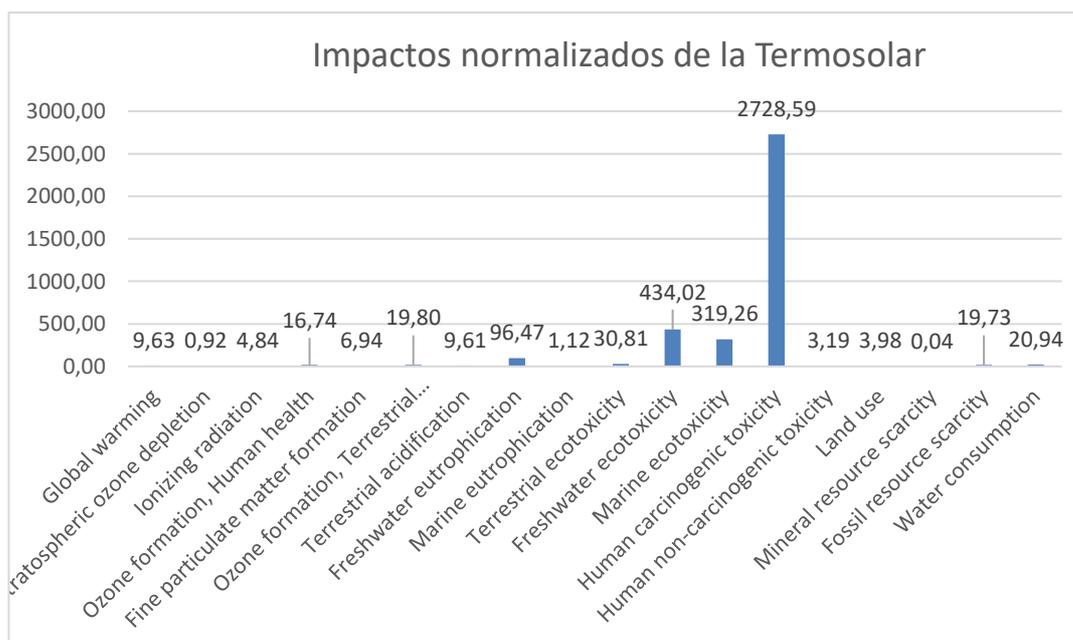
Tabla 12: Categorías de Impactos de planta termosolar

Categoría de impacto	Unidad	Total Ajustado	Producción	Construcción (simapro)	Construcción	Producec %	Constr %
Global warming	kg CO2 eq	7,71E+04	0	1,52E+08	7,71E+04	0%	100%
Stratospheric ozone depletion	kg CFC11 eq	5,52E-02	0	108,72	0,06	0%	100%
Ionizing radiation	kBq Co-60 eq	2,33E+03	0	4,59E+06	2,33E+03	0%	100%
Ozone formation, Human health	kg NOx eq	3,44E+02	0	6,79E+05	344,38	0%	100%
Fine particulate matter formation	kg PM2.5 eq	1,78E+02	0	3,50E+05	177,54	0%	100%
Ozone fomation, Terrestrial ecosystems	kg NOx eq	3,52E+02	0	6,93E+05	351,74	0%	100%
Terrestrial acidification	kg SO2 eq	3,94E+02	0	7,76E+05	393,96	0%	100%
Freshwater eutrophication	kg P eq	6,26E+01	0	1,23E+05	62,64	0%	100%
Marine eutrophication	kg N eq	5,16E+00	0	1,02E+04	5,16	0%	100%
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DCB	4,68E+05	0	9,23E+08	4,68E+05	0%	100%
Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DCB	1,09E+04	0	2,15E+07	1,09E+04	0%	100%
Marine ecotoxicity	kg 1,4-DCB	1,39E+04	0	2,74E+07	1,39E+04	0%	100%
Human carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	2,81E+04	0	5,54E+07	2,81E+04	0%	100%
Human non-carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	9,96E+04	0	1,96E+08	9,96E+04	0%	100%
Land use	m2a crop eq	2,46E+04	0	4,84E+07	2,46E+04	0%	100%
Mineral resource scarcity	kg Cu eq	4,32E+03	0	8,52E+06	4,32E+03	0%	100%
Fossil resource scarcity	kg oil eq	1,93E+04	0	3,81E+07	1,93E+04	0%	100%
Water consumption	m3	5,58E+03	4793,5	1,56E+06	790,80	87%	14%

Todos los impactos tienen una parte de origen durante la producción de magnitud despreciable respecto al producido durante la construcción de la instalación, excepto una que no es despreciable sino superior al impacto de origen de construcción. Esto se corresponde con una producción de energía donde la fuente de energía es renovable y sin impactos, como es la irradiación solar. La única excepción es el consumo de agua, requerido durante la vida productiva de la planta y que es origen de la mayoría del consumo de agua en su ciclo de vida. Este se debe al sistema de intercambio de calor del condensador que suele utilizar agua para enfriar el líquido caloportador, con sistemas como torres de refrigeración, y para la limpieza de los cristales que reflejan la luz solar.

Al normalizar los impactos se obtiene los siguientes resultados:

Gráfica 2: Impactos Normalizados de la Termosolar



De nuevo el mayor impacto es la toxicidad cancerígena en humanos proveniente mayoritariamente de la escoria subproducto de los hornos para los materiales de construcción.

4 COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Antes siquiera de comparar valores, solamente observando los diagramas de ciclo de vida de ambos casos, se observa que la planta termosolar tiene menos flujos de impactos o consumos que la planta termosolar, principalmente.

Al pasar a una comparación cuantitativa mediante los resultados obtenidos con el programa se obtiene la siguiente tabla:

Tabla 13: Comparación Total entre Planta de Carbón y Termosolar

Categoría de impacto	Mayor	Carbón	Termosolar	Diferencia
Global warming	Carbón	1,06E+06	7,71E+04	193%
Stratospheric ozone depletion	Termosolar	0,04	0,06	132%
Ionizing radiation	Termosolar	895,63	2327,42	162%
Ozone formation, Human health	Carbón	1503,34	344,38	177%
Fine particulate matter formation	Carbón	589,68	177,54	170%
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	Carbón	2915,88	351,74	188%
Terrestrial acidification	Carbón	2765,88	393,96	186%
Freshwater eutrophication	Carbón	350,48	62,64	182%
Marine eutrophication	Carbón	21,27	5,16	176%
Terrestrial ecotoxicity	Termosolar	2,14E+05	4,68E+05	154%
Freshwater ecotoxicity	Termosolar	1,07E+04	1,09E+04	102%
Marine ecotoxicity	Carbón	1,48E+04	1,39E+04	106%
Human carcinogenic toxicity	Termosolar	2,39E+04	2,81E+04	115%
Human non-carcinogenic toxicity	Carbón	4,10E+05	9,96E+04	176%
Land use	Termosolar	9,35E+03	2,46E+04	162%
Mineral resource scarcity	Termosolar	229,54	4320,82	195%
Fossil resource scarcity	Carbón	1,62E+05	1,93E+4	188%
Water consumption	Termosolar	299,00	5584,30	195%

En la tabla anterior se comparan los valores de las categorías de impactos no normalizadas. De las 18 categorías examinadas, en 10 de ellas el carbón es superior en magnitud a la termosolar. En la tabla se resalta en amarillo aquellas categorías de especial interés en este estudio.

La primera categoría es el calentamiento global, donde el carbón produce emisiones de efecto invernadero equivalentes dos órdenes de magnitud mayores. Esta diferencia es natural por el consumo de combustible por parte de la planta no renovable frente a la no renovable, que igualmente produce esta emisión pero durante la construcción. Otra comparativa con resultado evidente es la comparativa entre la reducción del consumo de combustible fósil, que comparte explicación con la categoría anterior. Una diferencia sustancial entre ambas fuentes es el uso de terreno, que es un 62% mayor en la termosolar. Esto se debe a que la planta de canales parabólicos modelo de este estudio (y recogida en Simapro) ocupa el equivalente a 3800 hectáreas de terreno agrícola, frente a las entorno 25 hectáreas que ocupa el modelo de la planta de carbón. Si bien esta cantidad de terreno no significa el tamaño de un parque de canales parabólicos sino el equivalente en terreno impactado por la construcción de este, no deja de ser representativo de esta tecnología la necesidad de ocupar terreno para aprovechar la irradiancia solar (medida en $\text{Wattios}/\text{m}^2$) y el contener el recorrido del conducto con fluido calentado por los espejos. Finalmente, como se ha

comentado en apartados anteriores, el consumo de agua en la planta termosolar es un impacto importante que supone una desventaja de esta tecnología frente a la fósil.

Si se desgrana la comparativa en dos etapas fundamentales, la etapa de producción y la etapa de construcción se puede analizar en más detalle:

Tabla 14: Comparativa de Impacto de Planta de carbón y Termosolar en etapa de producción

Categoría de impacto	Mayor?	Carbón-Potencia	Termosolar-Potencia	Diferencia
Global warming	Carbón	1,06E+06	0	100%
Stratospheric ozone depletion	Carbón	0,04	0	100%
Ionizing radiation	Carbón	800,87	0	100%
Ozone formation, Human health	Carbón	1494,67	0	100%
Fine particulate matter formation	Carbón	583,59	0	100%
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	Carbón	2906,87	0	100%
Terrestrial acidification	Carbón	2753,28	0	100%
Freshwater eutrophication	Carbón	348,72	0	100%
Marine eutrophication	Carbón	21,17	0	100%
Terrestrial ecotoxicity	Carbón	1,69E+05	0	100%
Freshwater ecotoxicity	Carbón	1,02E+04	0	100%
Marine ecotoxicity	Carbón	1,41E+04	0	100%
Human carcinogenic toxicity	Carbón	2,22E+04	0	100%
Human non-carcinogenic toxicity	Carbón	4,02E+05	0	100%
Land use	Carbón	9,22E+03	0	100%
Mineral resource scarcity	Carbón	139,63	0	100%
Fossil resource scarcity	Carbón	1,61E+05	0	100%
Water consumption	Termosolar	273,44	4793,5	194%

El resultado es más esclarecedor, pues se observa que los impactos a lo largo de los años de actividad de las plantas son continuos en todas las categorías en la planta de carbón mientras que la planta de carbón tiene impactos despreciables salvo el consumo de agua (marcado en amarillo). Esto es una ventaja de la termosolar, que concentrará sus impactos durante la construcción pero durante su vida útil no emite contaminantes en grandes magnitudes como el carbón.

Tabla 15: Comparativa de Impacto de Planta de Carbón y Termosolar en etapa de construcción

Categoría de impacto	Mayor?	Carbón-Potencia	Termosolar-Potencia	Mayor?	Carbón-Potencia	Termosolar-Potencia
Global warming	Termosolar	2,69E+03	7,71E+04	Carbón	1,73E+08	1,52E+08
Stratospheric ozone depletion	Termosolar	0,00	0,06	Termosolar	49,37	108,72
Ionizing radiation	Termosolar	94,77	2327,42	Carbón	6,08E+06	4,59E+06
Ozone formation, Human health	Termosolar	8,67	344,38	Termosolar	5,56E+05	6,79E+05
Fine particulate matter formation	Termosolar	6,09	177,54	Carbón	3,91E+05	3,50E+05
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	Termosolar	9,00	351,74	Termosolar	5,78E+05	6,93E+05
Terrestrial acidification	Termosolar	12,60	393,96	Carbón	8,08E+05	7,76E+05
Freshwater eutrophication	Termosolar	1,75	62,64	Termosolar	1,13E+05	1,23E+05
Marine eutrophication	Termosolar	0,09	5,16	Termosolar	5,83E+03	1,02E+04
Terrestrial ecotoxicity	Termosolar	4,55E+04	4,68E+05	Carbón	2,92E+09	9,23E+08
Freshwater ecotoxicity	Termosolar	5,54E+02	1,09E+04	Carbón	3,56E+07	2,15E+07
Marine ecotoxicity	Termosolar	7,26E+02	1,39E+04	Carbón	4,66E+07	2,74E+07
Human carcinogenic toxicity	Termosolar	1,70E+03	2,81E+04	Carbón	1,09E+08	5,54E+07
Human non-carcinogenic toxicity	Termosolar	8,12E+03	9,96E+04	Carbón	5,21E+08	1,96E+08
Land use	Termosolar	1,24E+02	2,46E+04	Termosolar	7,94E+06	4,84E+07
Mineral resource scarcity	Termosolar	89,91	4,32E+03	Termosolar	5,77E+06	8,52E+06
Fossil resource scarcity	Termosolar	5,76E+02	1,93E+04	Termosolar	3,69E+07	3,81E+07
Water consumption	Termosolar	25,57	790,80	Carbón	1,64E+06	1,56E+06

Al comparar las categorías de impactos con valores ajustados sucede que la termosolar es mayor en todas las categorías, y esto se debe a que al tener menos potencia y un factor de potencia entorno al 20-25%, tiene una menor producción de energía que es el valor por el que se ajusta los impactos a la unidad funcional. O lo que es lo mismo, la termosolar tiene más impactos de construcción por unidad de energía producida en su ciclo de vida. Con unas plantas termosolares de más potencia y/o mayor factor de potencia esta relación de impacto por energía sería menor. Sin embargo, si se compara el valor de impacto bruto de construcción el carbón tiene más impactos en más de la mitad de las categorías, si bien la termosolar se suele encontrar en el mismo orden de magnitud que e incluso supera al carbón en en varias categorías como el agotamiento de recursos minerales o el uso del terreno, pese a ser una planta de 10 veces menos potencia nominal.

5 CONCLUSIÓN

La primera conclusión supone remarcar un principio obvio, pero necesario recordar al público, y es que todo proceso humano tiene impactos. De este principio se puede concretar para este estudio en que toda tecnología tiene impactos, aunque esta sea renovable y se defina como “Green Energy”.

La tecnología termosolar presenta impactos tanto es su construcción como en su operación, en algunas categorías incluso superiores a la planta de carbón no renovable. Los datos han señalado además dos categorías de impactos especialmente relacionadas con esta tecnología, el consumo de agua y el terreno ocupado. Sin embargo, esto es una información valiosa por varios motivos. En primer lugar permite comparar las demandas de la planta en estos insumos frente a la región geográfica donde se está valorando instalarla. Otro motivo es conocer impactos de punto final de la instalación o sencillamente las consecuencias de su construcción y operación. Un ejemplo de ello es Andalucía, donde la alta irradiancia permite mitigar la dependencia del terreno pero donde se puede entrar en conflicto con la industria agraria por este terreno ocupado, aumentando el precio del suelo por la demanda y llevando a abandonar el campo a aquellos agricultores que no puedan adaptarse así como aumentando el precio de los alimentos. Así mismo, el consumo de agua puede verse amenazado en periodo de sequía o suponer una competición con otros sectores económicos dependientes de este recurso, como de nuevo puede ser la industria agroalimenticia de tanto peso en la comunidad autónoma, o el propio consumo humano en los municipios. Pero por otro lado, conocer estas desventajas de la tecnología puede ser un primer paso para encaminar la investigación de cara a solventarlas o en su defecto reducirlas, con la consecuencia de conseguir una tecnología más competitiva y respetuosa con el medio. Sistemas de limpieza más eficientes, que utilicen otras técnicas, o cristales que resistan la suciedad son desarrollos que mejorarían este tipo de planta así como el uso de sistemas de refrigeración con aire más eficientes, que se encuentran en investigación. Por otro lado la reducción de las emisiones contaminantes es una vía de investigación actual, y hay numerosas tecnologías ya en estado comercial como los filtros electrostáticos y otras en desarrollo avanzado como técnicas de captura de CO₂ para plantas no renovables.

Pese a los aspectos negativos del apartado anterior respecto a la termosolar, la comparativa de impactos de ciclo de vida muestra que los impactos en la termosolar son menores que las plantas de carbón. Especialmente esto se observa en el impacto de calentamiento global y en los impactos que aumentan la toxicidad del medio ambiente. Se produce un pico de contaminación en la construcción, especialmente por la obtención de materias, pero al contrario que el carbón la termosolar no presenta emisiones considerables a lo largo de su vida útil.

Se puede aprovechar este trabajo de divulgación para señalar un aspecto que observa tanto en el capítulo donde se desarrolla el origen extranjero del carbón como en las definiciones de los procesos que aporta Simapro, donde se observan impactos producidos por transporte de las materias primas o impactos producidos en los países de origen al extraer estos recursos. En primer lugar se corre el riesgo de minusvalorar estos impactos por producirse en un área lejana y considerar que no nos afecta, lo cual no es cierto para varias de las categorías de impacto que tienen un alcance global, como por ejemplo el calentamiento global. Además no resulta responsable no tener conciencia de los impactos locales que se producen en países extranjeros (y a menudo menos desarrollados) por la obtención de recursos que acaban convertidos en productos o servicios en nuestros mercados locales. Por otro lado, eventos recientes en la política internacional como el corte de exportación de gas desde Rusia a Europa debido al conflicto en Ucrania, y no tan recientes como el embargo de petróleo que provocó la crisis económica del 73, demuestran que el intercambio de recursos entre regiones geográficas puede verse estrangulado por motivos políticos y la dependencia de este comercio en recursos estratégicos puede provocar graves crisis en los países importadores. Para el caso de las dos tecnologías, ambas presentan grandes importaciones durante la etapa de construcción, sin embargo, la termosolar no depende de un combustible que debe importarse como el carbón, lo que favorece además contrarrestar la dependencia energética. Esto representa una ventaja de la termosolar valiosa en un país como España donde la dependencia energética suele rondar el 70%.

Uno de los objetivos secundarios de este trabajo es que los impactos recogidos en el inventario ayuden a la redacción de Estudios de Impacto Ambiental, así como los resultados obtenidos del ACV den pistas de otros impactos que se deben examinar a la hora de realizar dicho informe. Las emisiones gaseosas o en suspensión son la más evidentes pero también las más producidas. Sin embargo la modificación del terreno para la planta o el efecto del transporte del combustible deben también tenerse en cuenta. Por otro lado queda demostrado que

aquellos impactos mantenidos en el tiempo, aunque menores que los producidos durante la construcción acaban superando a estos segundos por su acumulación en el tiempo. Pero pueden resultar más difícil de cuantificar debido a los cambios de producción o de la instalación por factores externos, por lo que será de esperar más inexactitud en los informes por este motivo,

Este trabajo se ha visto limitado por la falta de datos sobre la construcción de las plantas usadas de referencia, lo que hubiese permitido unos resultados numéricos más precisos. Teniendo en cuenta que ninguna de las plantas que se encuentra en Simapro y ha sido usada para modelar la construcción de la planta se encuentra en Europa, queda por saber si las restricciones legales de la Unión Europea respecto a los impactos en la construcción reducen estos impactos tanto como para cambiar las tendencias obtenidas.

Así mismo se ha encontrado una inconsistencia entre datos de diferentes fuentes de similar calidad. Este se trata del dato de energía producida por la planta para el año 2019, donde Red Eléctrica Española (actual Redeia) da un valor de 637 GWh mientras que la Agencia Andaluza de la Energía da un valor de 690 GWh. Realmente ambos valores son muy parecidos y en el mismo orden de magnitud, y por mantener la coherencia con el origen del resto de datos se ha escogido el valor que aporta la Junta de Andalucía.

6 ANEXO

Anexo A: Modelos de Ciclos de Vida

Entradas /Salidas Planta de Carbón en Simapro

Productos								
Salidas conocidas a la tecnología. Productos y co-productos	Cantidad	Ud.	Cantidad	Asignación %	Categoría	Comentario		
Energía Eléctrica-Carbon	1000	MWh	Energy	100 %	Electrici...Production mix			
(Insertar línea aquí)								
Salidas conocidas a la tecnología. Productos evitados	Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2^DS	Mín	Máx	Comentario	
(Insertar línea aquí)								
Entradas								
Entradas conocidas desde la naturaleza (recursos)	Subcompartimento	Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2^DS	Mín	Máx	Comentario
Water, turbine use, unspecified natural origin, ES		25	m3	Indefinido				
(Insertar línea aquí)								
Entradas conocidas desde la tecnología (materiales/combustibles)	Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2^DS	Mín	Máx	Comentario	
Hard coal [Europe, without Russia and Turkey] hard coal, import from ID APOS, U	310	ton	Indefinido					
Hard coal power plant {GLO} construction, 500MW APOS, U	1,14	p	Uniforme		0	1,5		
(Insertar línea aquí)								
Entradas conocidas desde la tecnología (electricidad/calor)	Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2^DS	Mín	Máx	Comentario	
(Insertar línea aquí)								
Salidas								
Emisiones al aire	Subcompartimento	Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2^DS	Mín	Máx	Comentario
Sulfur dioxide, ES		0,485	ton	Indefinido				
Nitrogen oxides, ES		0,630	ton	Indefinido				
Carbon dioxide, fossil		989,011	ton	Indefinido				
(Insertar línea aquí)								

Entradas/Salidas Planta Termosolar

Productos								
Salidas conocidas a la tecnología. Productos y co-productos	Cantidad	Ud.	Cantidad	Asignación %	Categoría	Comentario		
Energía Eléctrica-Termosolar	1000	MWh	Energy	100 %	Electrici...Production mix			
(Insertar línea aquí)								
Salidas conocidas a la tecnología. Productos evitados	Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2^DS	Mín	Máx	Comentario	
(Insertar línea aquí)								
Entradas								
Entradas conocidas desde la naturaleza (recursos)	Subcompartimento	Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2^DS	Mín	Máx	Comentario
Water, river, ES		4793,5	m3	Indefinido				
(Insertar línea aquí)								
Entradas conocidas desde la tecnología (materiales/combustibles)	Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2^DS	Mín	Máx	Comentario	
(Insertar línea aquí)								
Entradas conocidas desde la tecnología (electricidad/calor)	Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2^DS	Mín	Máx	Comentario	
Concentrated solar power plant, solar thermal parabolic trough, 50 MW {ZA} concentrated solar	1	p	Indefinido					
(Insertar línea aquí)								
Salidas								
Emisiones al aire	Subcompartimento	Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2^DS	Mín	Máx	Comentario
(Insertar línea aquí)								
Emisiones al agua	Subcompartimento	Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2^DS	Mín	Máx	Comentario
(Insertar línea aquí)								
Emisiones al suelo	Subcompartimento	Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2^DS	Mín	Máx	Comentario
(Insertar línea aquí)								

Descripción Planta de Carbón de la Tecnófera

Productos								
Salidas conocidas a la tecnósfera. Productos y co-productos	Cantidad	Ud.	Cantidad	Asignación %	Categoría	Comentario		
Hard coal power plant [GLO] construction, 500MW APOS, U	1	p	Amount	100 %	Electricity ...\Infrastructure	EcoSpol01Location=GLO The materials depend on the capacity, fuel used, applied environmental technology and local conditions. Local condition particular, determine the amount of concrete for the foundation and the construction effort for the cooling tower and storage ya As medium load power plant the hard coal power plant achieves typically 4'000 fully load hours per year. As a result of warm and cold cycles, 150'000 fully load hours in total are assumed. This corresponds to a lifetime of 33 years. The lifetime is a conservativ estimate, since coal power plants may be operated 50 years or more. The fact that coal power plants are modernized several tim during their lifetime is not considered. That would cause an additional material consumption. However, increases the lifetim and reduces the material consumption per generated unit of energy. Production Volume Amount: 92		
Entradas								
Entradas conocidas desde la naturaleza (recursos)	Subcompartimento	Cantidad	Ud.	Distribución	DS*2 or 2*DS	Min	Máx	Comentario
Occupation, construction site	land	249937,76454996	m2a	Reg. normal	1,9993			(1,1,5,1,1,na) Estimation. General information on land use of coal po can be found in (Jensch 1988), (VDI 1993), (Jacobs et al. 1978), (OECD 1985), (DOE 1983), (IAEA 1991) and vary fr 100-3700 m2/MW. The largest deviations arise from the consideration of landfill sites for ash and residues from cleaning. In the U.S., these are deposited on the plant si Europe, the values vary from 100-600 m2/MW. Importa influencing factors are the size of the coal storage, cap plant, applied method of cooling, use of environment technology, area available and the chosen boundary. TI

Descripción Planta Termosolar de la Tecnófera

Productos								
Salidas conocidas a la tecnósfera. Productos y co-productos	Cantidad	Ud.	Cantidad	Asignación %	Categoría	Comentario		
Concentrated solar power plant, solar thermal parabolic trough, 50 MW [ZA] concentrated solar	1	p	Amount	100 %	Electricity ...\Infrastructure	Reference product unit for construction of a concentrated solar plant. Production Volume Amount: 1		
Entradas								
Entradas conocidas desde la naturaleza (recursos)	Subcompartimento	Cantidad	Ud.	Distribución	DS*2 or 2*DS	Min	Máx	Comentario
Occupation, industrial area	land	38363130	m2a	Reg. normal	1,0653			(4,4,4,3,2,na) Area occupied by CSP plant over the lifetime of the pla
Transformation, from grassland, natural (non-use)	land	1278771	m2	Reg. normal	1,0653			(4,4,4,3,2,na) Process of transforming unused area to industrial secto
Transformation, to industrial area	land	1278771	m2	Reg. normal	1,0653			(4,4,4,3,2,na) Process of transforming unused area to industrial secto
Entradas conocidas desde la tecnósfera (materiales/combustibles)								
Building, hall, wood construction [GLO] market for APOS, U	943	m2	Reg. normal	1,0653				(4,4,4,3,2,na) Includes warehouse maintenance, electrical control of l security
Excavation, hydraulic digger [GLO] market for APOS, U	22936	m3	Reg. normal	1,0653				(4,4,4,3,2,na) Piping- yardpiping backfill and excavation. It is assume whole excavated volume also has to be put back again pipes have been set. This activity does not have to be a the waste
Road [GLO] market for APOS, U	43193	my	Reg. normal	1,0653				(4,4,4,3,2,na) Roads primarily constructed for transport of constructi ease of operational and maintenance, transport of oil e
Steel, unalloyed [GLO] market for APOS, U	6391	kg	Reg. normal	1,0653				(4,4,4,3,2,na) Used for construction of site fences. The fences are 2m

Descripción del Carbón de la Tecnosfera

Productos									
Salidas conocidas a la tecnósfera. Productos y co-productos		Cantidad	Ud.	Cantidad	Asignación ?	Tipo de residuo	Categoría	Comentario	
Hard coal (Europe, without Russia and Turkey) hard coal, import from ID APOS, U			kg	Mass	100 %	no definido	Fuels\Coal\Market\Import	Production Volume Amount: 8590000128	
Salidas conocidas a la tecnósfera. Productos evitados		Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2*DS	Min	Máx	Comentario	
Entradas									
Entradas conocidas desde la naturaleza (recursos)		Subcompartimento	Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2*DS	Min	Máx	Comentario
Entradas conocidas desde la tecnósfera (materiales/combustibles)		Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2*DS	Min	Máx	Comentario	
Hard coal (ID) market for APOS, U		1,002	kg	Reg. normal	1,0502			(3,5,5,2,na) Compensation for product losses. For a lack of more re specific data this value is based on the estimation by D (2007) that generally 0.2% of losses occur during coal is assumed that these losses are released to the enviro form of particulate matter > 10 micrometer. Reference R., Bauer, C., Röder, A. (2007) Kohle. In: Dones, R. (Ed.) Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologische von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystem Ökobilanzen für die Schweiz. Final report ecoinvent No. 6-VI, Paul Scherrer Villigen, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH.	
Transport, freight, sea, bulk carrier for dry goods (GLO) market for transport, freight, sea, bulk		18	tkm	Reg. normal	1,9993			(3,3,3,1,1,na) Rough estimate using Google Earth and freight shipp Indonesian coal is exported from South, East or North I The major coal ports are Samarinda, Banjarmasin, Muara Meara Berau and Balikpapan (opensea.org, 2017) Reference(s): opensea.org, 2017. Blog: COAL: THE "BLACK GOLD" Of	

Anexo B: Suma, Media y Mediana de Potencias

Año	Producción GWh
2021	0
2020	4
2019	690
2018	3194
2017	3334
2016	990,8
2015	1705,3
2014	3005,1
2013	2923,8
2012	3556,1
2011	2341,1
2010	2489
2009	3221,7
2008	2023,6
2007	4228,1
2006	3691
2005	3989,2
2004	3984
2003	3548,9
2002	4074
2001	4018
2000	4310
Suma	61321,7
Mediana*20	64157
Media*20	55747

Año	Potencia (MW)	Producción GWh	Factor de Potencia
2018	2304	4424	21,9%
2019	2304	5166	25,6%
2020	2304	4538	22,5%
2021	2304	4706	23,3%
2022	2304	4123	20,4%
Media			22,7%
Mediana			22,5%

Anexo C: Orígenes de Impactos

10 Principales orígenes de Calentamiento Global en planta de carbón

Indicador: Caracterización | Valor de Corte: 0% | Unidades predet. | Excluir emisiones a largo plazo | Estándar | Por categoría de impacto | Grupo

No	Proceso	Proyecto	Unidad	Total	Energía Eléctrica-Carbon	Hard coal (Europe, without	Hard coal power plant (GLO)
	El total de todos los procesos		kg CO2 eq	1,74E8	9,89E5	6,81E4	1,73E8
1	Pig iron (RoW) pig iron production APOS, U	Ecoinvent 3 - allocation at	kg CO2 eq	3,01E7	x	680	3,01E7
2	Heat, district or industrial, other than natural gas (RoW) heat product	Ecoinvent 3 - allocation at	kg CO2 eq	1,2E7	x	3,15E3	1,2E7
3	Diesel, burned in building machine (GLO) processing APOS, U	Ecoinvent 3 - allocation at	kg CO2 eq	9,47E6	x	897	9,47E6
4	Iron sinter (RoW) iron sinter production APOS, U	Ecoinvent 3 - allocation at	kg CO2 eq	9,23E6	x	209	9,23E6
5	Clinker (RoW) production APOS, U	Ecoinvent 3 - allocation at	kg CO2 eq	8,83E6	x	141	8,83E6
6	Hard coal (CN) hard coal mine operation and hard coal preparation	Ecoinvent 3 - allocation at	kg CO2 eq	8,37E6	x	653	8,37E6
7	Quicklime, in pieces, loose (RoW) production APOS, U	Ecoinvent 3 - allocation at	kg CO2 eq	3,74E6	x	94,8	3,74E6
8	Pig iron (RER) pig iron production APOS, U	Ecoinvent 3 - allocation at	kg CO2 eq	3,72E6	x	90,4	3,72E6
9	Coke (RoW) coking APOS, U	Ecoinvent 3 - allocation at	kg CO2 eq	2,53E6	x	59	2,53E6
10	Transport, freight, sea, bulk carrier for dry goods (GLO) transport, freight	Ecoinvent 3 - allocation at	kg CO2 eq	2,21E6	x	3,06E4	2,18E6

10 Principales Orígenes de Toxicidad Cancerígena Humana en planta de carbón

Indicador: Caracterización | Valor de Corte: 0% | Unidades predet. | Excluir emisiones a largo plazo | Estándar | Por categoría de impacto | Grupo

No	Proceso	Proyecto	Unidad	Total	Energía Eléctrica-Carbon	Hard coal (Europe, without	Hard coal power plant (GLO)
	El total de todos los procesos		kg 1,4-DCB	1,09E8	-	2,22E4	1,09E8
1	Electric arc furnace slag (RoW) treatment of electric arc furnace slag,	Ecoinvent 3 - allocation at	kg 1,4-DCB	7,44E7	x	2,09E3	7,44E7
2	Basic oxygen furnace slag (GLO) treatment of basic oxygen furnace s	Ecoinvent 3 - allocation at	kg 1,4-DCB	1,85E7	x	407	1,85E7
3	Sludge from steel rolling (RoW) treatment of, residual material landfill	Ecoinvent 3 - allocation at	kg 1,4-DCB	5,14E6	x	121	5,14E6
4	Spoil from hard coal mining (GLO) treatment of, in surface landfill A	Ecoinvent 3 - allocation at	kg 1,4-DCB	1,7E6	x	1,68E4	1,68E6
5	Electric arc furnace dust (RoW) treatment of electric arc furnace dust,	Ecoinvent 3 - allocation at	kg 1,4-DCB	1,32E6	x	36,4	1,32E6
6	Blast furnace slag (RoW) treatment of blast furnace slag, residual mat	Ecoinvent 3 - allocation at	kg 1,4-DCB	1,13E6	x	26,1	1,13E6
7	Basic oxygen furnace waste (RoW) treatment of, residual material lan	Ecoinvent 3 - allocation at	kg 1,4-DCB	1E6	x	27	1E6
8	Redmud from bauxite digestion (RoW) treatment of, residual materia	Ecoinvent 3 - allocation at	kg 1,4-DCB	7,76E5	x	32,2	7,76E5
9	Copper slag (GLO) treatment of copper slag, residual material landfill	Ecoinvent 3 - allocation at	kg 1,4-DCB	5,23E5	x	3,45	5,23E5
10	Spoil from lignite mining (GLO) treatment of, in surface landfill APC	Ecoinvent 3 - allocation at	kg 1,4-DCB	4,27E5	x	575	4,26E5

10 Principales Orígenes de Uso de Tierra en planta termosolar

Indicador: Caracterización Valor de Corte: 0% Unidades predet. Excluir emisiones a largo plazo Estándar Grupo

Categoría: Land use Por categoría de impacto

No	Proceso	Proyecto	Unidad	Total	Energía Eléctrica-Termos	Concentrated solar power
	El total de todos los procesos		m2a crop e	4,84E7	-	4,84E7
1	Concentrated solar power plant, solar thermal parabolic trough, 50 M	Ecoinvent 3 - allocation at	m2a crop e	3,28E7	x	3,28E7
2	Potassium chloride, industrial grade (CL) potassium chloride product	Ecoinvent 3 - allocation at	m2a crop e	1,19E7	x	1,19E7
3	Road (RoW) road construction APOS, U	Ecoinvent 3 - allocation at	m2a crop e	6,27E5	x	6,27E5
4	Onshore well, oil/gas (GLO) production APOS, U	Ecoinvent 3 - allocation at	m2a crop e	3,11E5	x	3,11E5
5	Sand (RoW) sand quarry operation, extraction from river bed APOS,	Ecoinvent 3 - allocation at	m2a crop e	1,65E5	x	1,65E5
6	Limestone, unprocessed (IN) limestone quarry operation APOS, U	Ecoinvent 3 - allocation at	m2a crop e	1,63E5	x	1,63E5
7	Sawlog and veneer log, softwood, measured as solid wood under bark	Ecoinvent 3 - allocation at	m2a crop e	1,59E5	x	1,59E5
8	Sawlog and veneer log, softwood, measured as solid wood under bark	Ecoinvent 3 - allocation at	m2a crop e	1,53E5	x	1,53E5
9	Hard coal (CN) hard coal mine operation and hard coal preparation	Ecoinvent 3 - allocation at	m2a crop e	1,47E5	x	1,47E5
10	Non-sulfidic tailing, off-site (GLO) treatment of APOS, U	Ecoinvent 3 - allocation at	m2a crop e	1,24E5	x	1,24E5

10 Principales Orígenes de Toxicidad Humana Cancerígena en planta termosolar

Indicador: Caracterización Valor de Corte: 0% Unidades predet. Excluir emisiones a largo plazo Estándar Grupo

Categoría: Human carcinogenic toxicity Por categoría de impacto

No	Proceso	Proyecto	Unidad	Total	Energía Eléctrica-Termos	Concentrated solar power
	El total de todos los procesos		kg 1,4-DCB	5,54E7	-	5,54E7
1	Electric arc furnace slag (RoW) treatment of electric arc furnace slag,	Ecoinvent 3 - allocation at	kg 1,4-DCB	3,69E7	x	3,69E7
2	Basic oxygen furnace slag (GLO) treatment of basic oxygen furnace s	Ecoinvent 3 - allocation at	kg 1,4-DCB	8,31E6	x	8,31E6
3	Sludge from steel rolling (RoW) treatment of, residual material landfil	Ecoinvent 3 - allocation at	kg 1,4-DCB	2,59E6	x	2,59E6
4	Spoil from hard coal mining (GLO) treatment of, in surface landfill A	Ecoinvent 3 - allocation at	kg 1,4-DCB	1,31E6	x	1,31E6
5	Electric arc furnace dust (RoW) treatment of electric arc furnace dust,	Ecoinvent 3 - allocation at	kg 1,4-DCB	6,69E5	x	6,69E5
6	Blast furnace slag (RoW) treatment of blast furnace slag, residual mat	Ecoinvent 3 - allocation at	kg 1,4-DCB	5,18E5	x	5,18E5
7	Basic oxygen furnace waste (RoW) treatment of, residual material lan	Ecoinvent 3 - allocation at	kg 1,4-DCB	4,5E5	x	4,5E5
8	Hard coal ash (RoW) treatment of, residual material landfill APOS, U	Ecoinvent 3 - allocation at	kg 1,4-DCB	4,29E5	x	4,29E5
9	Hazardous waste, for incineration (RoW) treatment of hazardous was	Ecoinvent 3 - allocation at	kg 1,4-DCB	3,9E5	x	3,9E5
10	Hazardous waste, for incineration (RoW) treatment of hazardous was	Ecoinvent 3 - allocation at	kg 1,4-DCB	3,9E5	x	3,9E5

REFERENCIAS

- Agencia Internacional de la Energía. 2023.** Agencia Internacional de la Energía-Combustibles y tecnologías. [En línea] 11 de Mayo de 2023. [Citado el: 20 de Junio de 2023.] <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/>.
- Banco de España. 2022.** *Informe Anual. Capítulo 4, España y la Unión Europea frente a la Crisis Energética: Ajuste a corto plazo y retos pendientes.* Madrid : s.n., 2022.
- Clean Air Technology Center. 1999.** *Óxidos de Nitrógeno (NOx) ¿Por qué y cómo se controlan?* Chicago : s.n., 1999.
- Decarbonization of ASEAN's power sector: A holistic approach.* **Lang, Hon Chung. 2023.** s.l. : Energy Reports, 2023, Vol. 9.
- Eurocoal. 2018.** EURACOAL. [En línea] 2018. [Citado el: 6 de Junio de 2023.] <https://euracoal.eu/info/country-profiles/spain/>.
- Fernandez Mateo, Ignacio. 2015.** *El sector de la minería en España ¿Llega el fin del Carbón Nacional?* Madrid : s.n., 2015.
- Jiménez, S. 2012.** *Combustión de Carbón.* Laboratorio de investigación en tecnologías de la combustión. 2012.
- Junta de Castilla y León.** Energía y Minería en Castilla y León. [En línea] [Citado el: 3 de Junio de 2023.] <https://energia.jcyl.es/web/es/biblioteca/>.
- Mark Goedkoop, Michiel Oele, Jorrit Leijting, Tommie Ponsioen, Ellen Meijer. 2016.** *Introduction to LCA with SimaPro.* s.l. : Pré, 2016.
- Ministerio de Asuntos Exteriores, Unión Europea y Cooperación.** Hablemos de Europa. [En línea] [Citado el: 4 de Julio de 2023.] <https://www.hablamosdeeuropa.es/es/Paginas/Medioambiente.aspx>.
- Ministerio para la Transición Ecológica y Reto Demográfico.** Impacto de la eutrofización en el uso y calidad de las aguas. [En línea] [Citado el: 3 de Julio de 2023.] <https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/estado-y-calidad-de-las-aguas/proteccion-eutrofizacion/impacto/>.
- Pamela L. Spath, Margaret K. Mann, and. 1999.** *Life Cycle Assessment of Coal-fired Power Production.* National Renewable Energy Laboratory. 1999. pág. 172.
- Parco, Andrés López. 2022.** *Evaluación de impacto ambiental de nuevas tecnologías de tratamiento de aguas.* Universidad de Alcalá. Alcalá de Henares : s.n., 2022. Trabajo de Fin de Grado.
- Protermosolar. 2019.** Helionoticias. [En línea] 21 de Febrero de 2019. [Citado el: 12 de Marzo de 2023.] <https://helionoticias.es/ahorro-de-agua-en-la-termosolar/>.
- . Protermosolar. [En línea] [Citado el: 26 de Febrero de 2023.] <https://www.protermosolar.com/la-energia-termosolar/que-es-tipos-de-plantas-beneficios/>.
- Red Eléctrica Española. 2020.** *Síntesis Informe Del Sistema Eléctrico Español 2019.* Alcobendas : s.n., 2020.
- RETEMA. 2022.** Uso eficiente del agua en plantas termosolares gracias a las tecnologías de Veolia Water Technologies. *RETEMA (Revista Técnica de Medio Ambiente).* 2022.

GLOSARIO

LCOE: Coste Normalizado de la Energía (<i>Levelized Cost Of Energy</i>)	pg. 12
EPC: Proyecto de diseño, Construcción y puesta en marcha (<i>Engineering, Procurement and Construction</i>)	pg. 13
<i>Know-how</i> : conocimiento práctico de una tecnología y procedimiento	pg. 13
ASEAN: Asociación de Naciones de Asia Suroriental	pg. 17
UE: Unión Europea	pg. 17
<i>Stakeholders</i> : grupos de interés	pg. 18
STEM: Ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas (<i>Science, Technology, Engineering and Mathematics</i>)	pg. 18
<i>Smog</i> : niebla de origen contaminante	pg.19