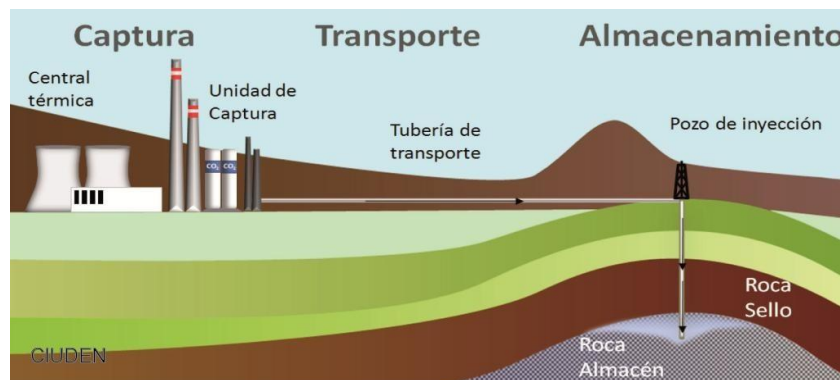


MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA ENERGÉTICA
SOSTENIBLE

TRABAJO FIN DE MÁSTER

ANÁLISIS TÉCNICO, ECONÓMICO Y AMBIENTAL DE UNA CENTRAL TÉRMICA CON CAPTURA DE CO₂



Estudiante: Regalado Goitia, Ander.

Directora: Rozas Guinea, Saroa.

Curso: 2021-2023

Fecha: Bilbao, 19 de septiembre 2023.

Índice

Índice de figuras	4
Índice de tablas	5
Resumen.....	6
Laburpena.....	6
Abstract	6
Introducción	7
1. Contexto	8
1.1 La historia del carbón en España	8
1.2 Situación actual	9
1.3 Desarrollo Sostenible.....	10
1.4 Crisis energética.....	11
2. Objetivos y Alcance	15
3. Análisis del Estado del Arte	16
3.1 Centrales convencionales	16
3.2 Mejores técnicas disponibles	20
3.2.1 Marco Legal en Europa y España	21
3.2.2 Documentos MTD	22
3.3 Unidad separadora de aire	22
3.4 Caldera de lecho fluidizado	24
3.4.1 Lecho de la caldera.....	25
3.5 Oxidación.....	26
3.6 Captura de CO ₂	27
3.7 Almacenamiento de CO ₂	29
4. Análisis de viabilidad	30
4.1 Acciones del proyecto	30
4.1.1 Fase de instalación	30
4.1.2 Fase de producción	31
4.1.3 Fase de desmantelamiento	31
4.2 Identificación y valoración de factores.....	31
4.3 Examen de alternativas	33
4.3.1 Descripción de las alternativas.....	33

4.3.2	Métodos de valoración	34
4.4	Análisis ambiental de la solución propuesta.....	39
4.4.1	Valoración cualitativa	42
4.4.2	Valoración cuantitativa	44
4.5	Análisis económico de la solución propuesta	47
4.5.1	Costes de Construcción	47
4.5.2	Costes de Operación y Mantenimiento (O&M)	48
4.5.3	Coste del combustible	49
4.5.4	LCOE (Coste Nivelado de la Energía)	51
5.	Conclusiones.....	54
6.	Referencias y Bibliografía	56
ANEXOS	63
Anexo I.	Matriz de Leopold	64
Anexo II.	Valoración cualitativa.....	65
Anexo III.	Valoración cuantitativa	73
Anexo IV.	Levelized Cost of Energy (LCOE)	77

Índice de figuras

Figura 1. Centrales térmicas de carbón en España. Autora: Pastora M. Bello.	8
Figura 2. Objetivos del Desarrollo Sostenible. Fuente: Unión Europea.....	11
Figura 3. Gráfico circular estructura de generación eléctrica enero-junio 2021. Fuente: REE.	11
Figura 4. Gráfico de energía comprada respecto del total consumida. Fuente: Statista.	12
Figura 5. Gráfico evolución euros/MWh. Fuente: Statista.	14
Figura 6. Ciclo de Vapor de central convencional con economizador, sobrecalentador y recalentador con su ciclo Rankine Ideal T-s. Fuente: Apuntes termodinámica UPV/EHU.	17
Figura 7. Estado del arte internacional de centrales de carbón. Autor: Alejandro Miguel Pérez.....	17
Figura 8. Separadores ciclón (izq.) y venturi (dch.).....	19
Figura 9. Esquema planta separadora de aire mediante método Linde-Thompson.	23
Figura 10. Esquema de una caldera de lecho fluidizado. Fuente: Javier Hernández Rodríguez.	25
Figura 11. Comparativa de llamas (izq. a dch.) convencional - oxidación sin exceso de oxígeno - oxidación con exceso.	27
Figura 12. Esquema de central convencional reconvertida a oxidación.	28
Figura 13. Mina a cielo abierto en la cuenca de Puertollano. Fuente: Endesa.....	45
Figura 14. Clasificación ASTM de carbones combustibles. Fuente: ASTM.	49
Figura 15. Precio del carbón en el mercado internacional. Fuente: Markets Insider.....	50
Figura 16. Gráfico evolución del precio del carbón. Fuente: Markets Insider.....	51
Figura 17. LCOE Generación eléctrica. Fuente: Lazard.	53

Índice de tablas

Tabla 1. Clasificación de centrales térmicas de carbón.	16
Tabla 2. Factores afectados por el proyecto.	32
Tabla 3. Criterios de evaluación de alternativas.	34
Tabla 4. Puntuaciones según método de puntuación única.	35
Tabla 5. Reparto de punto por criterio y alternativa.	36
Tabla 6. Ponderación de las alternativas y criterios.	36
Tabla 7. Puntuación final por alternativa.	36
Tabla 8. Comparación de alternativas para la matriz de concordancia.	37
Tabla 9. Matriz de concordancia.	38
Tabla 10. Diferencias entre puntuaciones de alternativas para calcular la matriz de discordancia.	38
Tabla 11. Matriz de discordancia.	39
Tabla 12. Comparación de alternativas.	39
Tabla 13. Factores más afectados negativamente.	40
Tabla 14. Factores más afectados positivamente.	41
Tabla 15. Reparto de UIP.	42
Tabla 16. Atributos de valoración cualitativa.	43
Tabla 17. Factores con mayor importancia negativa.	43
Tabla 18. Factores con mayor importancia positiva.	44
Tabla 19. Resultados valoración cuantitativa.	46
Tabla 20. Datos técnicos de la central modelo.	47
Tabla 21. CTC CT Lecho fluido y Captura de CO ₂	48
Tabla 22. IPRI Sector energético desde 2011-2023. Fuente: INE.	48
Tabla 23. Parámetros LCOE central modelo.	52
Tabla 24. LCOE Central modelo.	52

Resumen

Mediante este proyecto se concluye que es viable restaurar las centrales térmicas de carbón convencionales para mitigar los efectos de las grandes crisis actuales: el Cambio Climático y la crisis energética. El alcance es a nivel nacional. Los eventos pandémicos y conflictos geopolíticos han ocasionado un incremento en el precio de la energía que la vuelve inaccesible para algunos sectores, notándose en una bajada del PIB del 11,5% en 2021 y el aumento de la tasa de paro en 2021 hasta valores cercanos a la época de crisis en 2009-2010. Para ello reacondicionaremos las centrales y las proporcionaremos nuevas instalaciones MTD para llevar a cabo la captura del CO₂ y aumentar su sostenibilidad, a pesar de tener un bagaje ambiental negativo debido a otros impactos. Por otro lado, es viable económicamente con un LCOE de 79 €/MWh, gracias al uso del carbón nacional, frente a otras formas de generación convencionales, aumentando la independencia energética, y una opción factible para dar versatilidad al mix energético y asegurar el abastecimiento junto con las renovables.

Laburpena

Proiektu honen bidez ondorioztatzen da bideragarria dela ikatzezko zentral termiko konbentzionalak lehengoratzea, egungo krisi handien ondorioak arintzeko: klima-aldaketa eta energia-krisia. Irismena nazio mailakoa da. Gatazka geopolitikoak eta pandemiak bezalako gertaerek energiaren prezioa igotzea eragin dute, eta horrek eskuraezin bihurtu du zenbait sektorerentzat, Honek eragin nabaritsuak izan ditu, 2021ean BPGren % 11,5eko jaitsiera eraginez eta 2021ean langabezia-tasaren igoaraziz, 2009-2010 aldiko krisi-garaitik hurbil dauden balioetaraino. Horretarako, zentralak berregokitu eta MTD instalazio berriak jarriko ditugu, CO₂ atzitzeko eta jasangarritasuna handitzeko, nahiz eta beste inpaktu batzuen ondorioz ingurumen-ezagutza negatiboa izan. Bestalde, ekonomikoki bideragarria da 79 €/MWh-ko LCOE batekin, ikatz nazionalaren erabilerari esker, ohiko beste sortze-modu batzuen aldean, independentzia energetikoa handituz, eta aukera egingarria mix energetikoari aldakortasuna emateko eta hornikuntza berriztagarriekin batera ziurtatzeko.

Abstract

Through this project it is concluded that it is feasible to restore conventional coal-fired power plants to mitigate the effects of the current major crises: Climate Change and the energy crisis. The scope is nationwide. Events such as geopolitical and pandemic conflicts have caused an increase in the price of energy that makes it inaccessible for some sectors, this is marked by a drop in GDP of 11.5% in 2021 and an increase in the unemployment rate in 2021 to values close to the crisis period in 2009-2010. To this end, we will refurbish the plants and provide them with new BAT facilities to carry out CO₂ capture and increase their sustainability, despite having a negative environmental baggage due to other impacts. On the other hand, it is economically viable with an LCOE of 79 €/MWh, thanks to the use of national coal, compared to other conventional forms of generation, increasing energy independence, and a feasible option to give versatility to the energy mix and ensure supply along with renewables.

Palabras clave

Carbón, Central térmica convencional, Captura de CO₂, Oxidación, Dependencia energética, LCOE, Análisis cualitativo, Sostenibilidad, Crisis energética, Impacto.

Introducción

En este proyecto, se analiza la viabilidad técnica, económica y ambiental de las centrales térmicas que empleen como combustible el carbón en España. Actualmente, si observamos el mix energético nacional, podremos observar como a los combustibles fósiles todavía les corresponde un peso mayoritario, predominando el gas natural, por ejemplo, con una generación en Ciclos Combinados del 20,7% de Enero a junio de 2022 (REE, 2022).

Teniendo en cuenta que vivimos bajo la influencia de numerosos conflictos geopolíticos y eventos importantes como la pandemia que encarecen y ponen en riesgo el suministro de combustibles fósiles, y que, por otro lado, las energías renovables, todavía precisan de desarrollo tecnológico para poder producir y almacenar la producción eléctrica de manera eficiente, es vital buscar alternativas sostenibles a corto plazo. Aquí nace la idea, de recuperar las centrales de carbón de la península que hoy en día se encuentran en fase de clausura o en sus últimos años de vida, dejando de lado el carbón como combustible siendo este un posible aliado sostenible y con una fuerte infraestructura implantada por toda la península.

Lo cierto es que, para cumplir con las condiciones de sostenibilidad, se han de integrar ciertas actualizaciones en las viejas fábricas de carbón. Inspirándonos en algunas centrales que podemos encontrar por Europa, Estado Unidos o Canadá, podemos observar como con una separación de aire previa, para realizar un proceso de oxidación con oxígeno puro, una caldera de lecho fluidizado, y por último la captura de los gases de salida, somos capaces de generar energía eléctrica sin emisión de gases contaminantes a la atmósfera. Aunque parte de estas medidas correctoras, reducen el rendimiento de la central de un 46% a un 37%, por ello mediante este proyecto se pretende analizar su viabilidad desde diferentes puntos de vista.

Para desarrollar el estudio comparativo, primero se ha analizado la viabilidad técnica, implementando las mejores técnicas disponibles para nuestras centrales térmicas. Luego se ha llevado a cabo un análisis de sostenibilidad ambiental para medir el impacto de este proyecto. Por último, se ha realizado un LCOE para evaluar esta alternativa desde un punto de vista económico y poder ser comparada con otras formas de generación.

1. Contexto

1.1 La historia del carbón en España

En este proyecto se analiza la viabilidad técnica, económica y ambiental de las centrales térmicas de carbón en España, pero antes de entrar en materia, es preciso comprender de dónde venimos. El carbón ha sido el primer gran combustible histórico, haciendo posible la era de la revolución industrial que comenzó en España a mediados del siglo XVIII (Primera fase de la revolución industrial) (Fernández Mateo, 2015), y con más protagonismo en la segunda fase característica del siglo XIX.

La primera central térmica de carbón en España comenzó a funcionar en el año 1965 en Asturias, la central térmica de Soto de Rivera, y conforme la demanda energética del país fue aumentando, la necesidad de construir cada vez más centrales motivó el nacimiento en 1976, de la central térmica más grande del territorio nacional, la central de As Pontes, en Galicia, con una potencia instalada total de 2338 MW (Historia de la mina de As Pontes, s. f.). La gran mayoría de centrales de carbón se encuentran en la cornisa cantábrica de la península (Figura 1), ya que es en las regiones de Asturias, Galicia, País Vasco y el norte de Castilla y León donde se encuentran las grandes reservas de carbón nacional, además de poseer numerosos puertos para las importaciones. Aunque actualmente cabe destacar que el carbón empleado en las centrales españolas proviene únicamente del extranjero, países como Colombia o Rusia son grandes exportadores (Greenpeace, 2018).

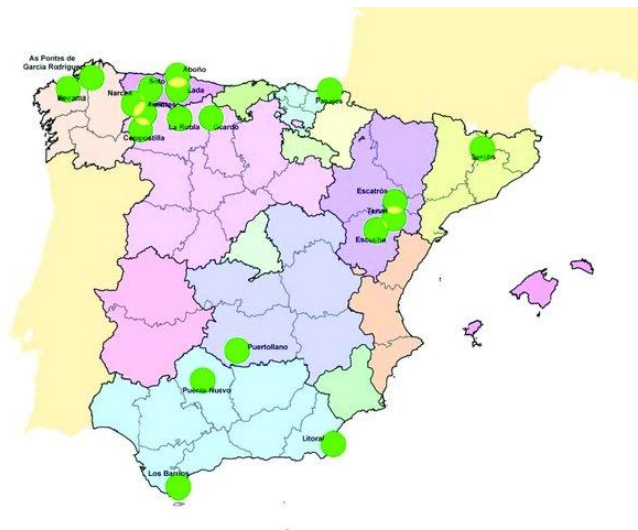


Figura 1. Centrales térmicas de carbón en España. Autora: Pastora M. Bello.

En total, en España hemos llegado a ver hasta 21 centrales térmicas, aunque debido a los fuertes impactos ambientales que estas producen, en la actualidad la sociedad busca una descarbonización de la economía y una transición energética hacia fuentes verdes.

1.2 Situación actual

A pesar de los fuertes esfuerzos políticos promovidos en occidente para la búsqueda de la descarbonización, este continúa siendo uno de los combustibles más empleados a nivel mundial. Esto se debe a que, grandes productores como China, India o Rusia siguen basando su producción eléctrica en combustibles fósiles. Y no sólo estos, sino que países emergentes y en vías de desarrollo, basan su producción eléctrica en este tipo de combustibles, ya que el desarrollo tecnológico llevado a cabo durante años hace que la relación inversión/producción-precio de estas centrales sea más competitivo frente a las nuevas formas de generación verde como la eólica o la solar. En el año 2019, de acuerdo con la International Energy Agency, el carbón supuso más de un tercio de la generación de electricidad a nivel mundial (IEA, s. f.). Además, desempeña un papel decisivo en las industrias del hierro y del acero.

Actualmente, en cuanto al carbón se refiere Según la World Coal Association, hay más de 1,06 billones de toneladas de reservas probadas de carbón en todo el mundo, principalmente en Estados Unidos, Rusia, China, Australia e India. Según estimaciones, y al ritmo actual de producción y consumo, hay suficiente carbón para aproximadamente 132 años (World Coal Association, s. f.).

El mundo ha declarado la guerra al carbón, desde Europa y Estados Unidos se pretende promover la descarbonización con diferentes ayudas y tratados, como el llevado a cabo en Sudáfrica para acabar con la industria del carbón formando la Asociación para la Transición Energética Justa (JETP). Actualmente el G-7 y otros países como los nórdicos Dinamarca y Noruega, se enfocan en promover esta descarbonización en los países del sureste asiático como Vietnam, India e Indonesia con ayudas que podrían superar los 10.000M de euros. (Ana Llorente, 2022).

En el marco nacional, se sigue la dinámica europea hacia una transición energética y todas las centrales térmicas de carbón se encuentran en un plan de desmantelamiento. Desde un punto de vista ambiental, no es viable la producción eléctrica mediante las centrales convencionales de carbón. Por ejemplo, según datos recopilados por Greenpeace en 2017, el 50% de las emisiones de CO₂ asociadas a la producción eléctrica provenían de esta forma de generación, cuando en el mix eléctrico, a las centrales de carbón sólo les correspondía un 17% (Greenpeace, 2018).

El proceso de desmantelamiento comenzó a principios del 2010, y su finalidad era acabar con las centrales térmicas alimentadas con carbón para 2020. A finales del 2011, había 21 centrales térmicas de carbón funcionando en España (REE, 2011), y para finales del 2018, esta cantidad se redujo a 15. Para verano del 2020, se desconectaron siete más, y se solicitó el cierre de cuatro, por lo que para 2021 sólo se permitiría a 3 centrales de este tipo producir electricidad (PNIEC, 2021). Esto no sólo fue incentivado por el compromiso climático, si no que el carbón también perdió competitividad frente al gas natural, que sufrió un fuerte

descenso en los precios desde el 2019, y los costes por emisión de tonelada de CO₂ aumentaron considerablemente (Manuel Vilaseró, 2020).

1.3 Desarrollo Sostenible

Creo que hoy en día todos hemos oído hablar del cambio climático, y es que, desde la revolución industrial, las actividades antropogénicas han acelerado este evento climático (IPCC, 2013) sin permitir a la naturaleza adaptarse a él. Eventos como la pérdida de biodiversidad, el aumento de las sequías, las fuertes tormentas o las frecuentes olas de calor, hacen latente este cambio.

Para frenar este proceso autodestructivo, desde la Comisión Brundtland (Brundtland et al., 1987), liderada por Gro Harlem Brundtland, ex-primera ministra noruega, se redactó un informe llamado el Informe Brundtland para las Naciones Unidas en 1987, donde se hablaba por primera vez del desarrollo sostenible. Este se define en el mismo informe como aquel que *“satisface las necesidades del presente sin comprometer las necesidades de las futuras generaciones”*. La sostenibilidad es un concepto que abarca tres campos principales, por un lado, está la sostenibilidad social, enfocada en integrar en los nuevos proyectos, ideas por un futuro más justo e inclusivo para la sociedad. La sostenibilidad económica, es un concepto que trata acerca de la viabilidad económica de una acción, entendiendo esta como un proyecto o servicio, y por último, la sostenibilidad ambiental, que se centra en el desarrollo de ideas respetuosas con el medio ambiente. Estos tres campos no son independientes (Banguero Lozano, 2017), ya que tienen una fuerte sinergia entre ellos. En este proyecto se tendrán en cuenta las tres vías de desarrollo sostenible para el análisis de viabilidad de una central tipo de oxi-combustión con captura de CO₂.

Por último, mencionar la estrategia propuesta por la Unión Europea mediante una serie de objetivos, con sus metas asociadas. Estos son los Objetivos de Desarrollo Sostenible, son 17 y han sido promocionados como *“el plan maestro para conseguir un futuro sostenible para todos”* (Naciones Unidas, 2015). Los 17 (Figura 2) están relacionados, buscando una sinergia para satisfacer las necesidades del planeta y sus habitantes, de tal manera que se consiga un desarrollo económico inclusivo y que respete el medio ambiente.



Figura 2. Objetivos del Desarrollo Sostenible. Fuente: Unión Europea.

1.4 Crisis energética

Es en este punto donde cobra sentido este proyecto, aunque antes demos un repaso por la industria energética española y su dependencia energética. Este país está totalmente enfocado hacia las energías renovables de cara al futuro (PNIEC, 2020), es más, como se puede observar en el siguiente gráfico, la estructura de generación de enero a junio de 2021 (Figura 3) el 51,4% de la energía eléctrica se genera a partir de fuentes renovables.

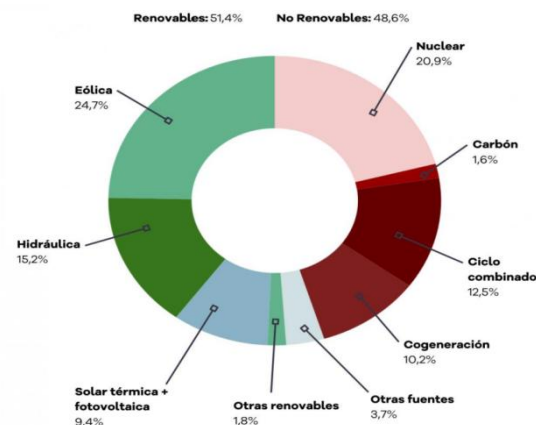


Figura 3. Gráfico circular estructura de generación eléctrica enero-junio 2021. Fuente: REE.

Aunque siendo realistas, aún nos encontramos lejos de lograr abastecer de electricidad mediante únicamente energías renovables. En España, el consumo final bruto de energía a partir de fuentes renovables ronda el 15% en 2018 (APPA Renovables), y si tenemos en cuenta que, con 5 centrales nucleares, producimos más vatios hora que con 1200 parques eólicos, queda patente que hoy en día estamos lejos de lograr una producción eficiente y segura mediante renovables. Porque podríamos dedicar todos los esfuerzos a construir centrales fotovoltaicas o eólicas, pero no debemos olvidar que, aunque no se consuman combustibles fósiles, estas generan multitud de impactos que no harían sostenible el mix energético. Por eso es necesario buscar otras alternativas, ya que, debido al fuerte miedo provocado por los recientes desastres nucleares y la escasez de cementerios nucleares, esta tecnología de producción también está desestimada en los planes a futuro a nivel nacional. Por esto, el proyecto se centra en el carbón como alternativa a corto plazo para hacer frente la crisis energética actual.

Además de la estructura energética española, debemos tener en cuenta otro factor importante que agrava la crisis energética nacional, la **dependencia energética**. Este término hace referencia a la energía bruta que compramos frente a la que consumimos. Como en España, no contamos con fuentes de hidrocarburos como el petróleo o el gas natural, tenemos la obligación de importar la mayor parte de nuestra energía, sobre todo para cubrir los momentos de baja generación renovable. Según Statista, la fuente de energía primaria más consumida es el petróleo, un 50%, y le sigue el gas natural en un 25%. Entre las renovables y la nuclear alcanzan un 10% y el resto las demás, como el carbón y otras fuentes. En total, España compró cerca del 75% de la energía que consumió en 2019 (Figura 4).

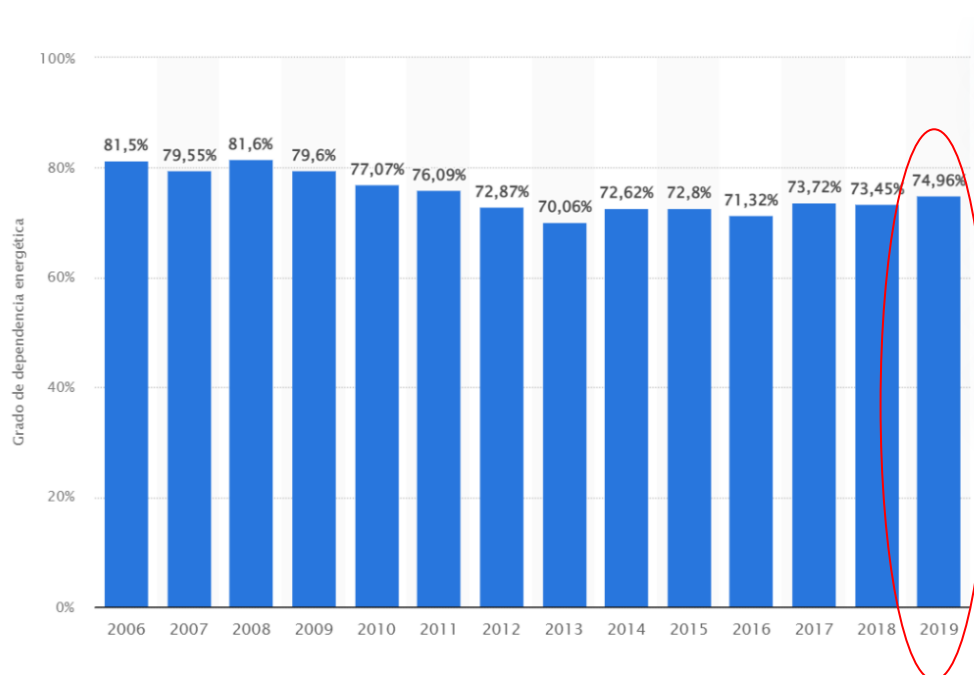


Figura 4. Gráfico de energía comprada respecto del total consumida. Fuente: Statista.

Como se observa en el gráfico, la mayor parte de la energía que utilizamos en España es importada, donde se incluye el consumo de combustible de las centrales térmicas. Hasta tres cuartas partes son importadas, lo que tiene un impacto económico importante. La subida de los precios de la energía importada ya sea por el mercado en sí o por crisis geopolíticas como la guerra entre Ucrania y Rusia, tiene un efecto en cascada encareciendo otros bienes y servicios. A pesar de que las inversiones en energías renovables en los últimos años han reducido la dependencia energética en cinco puntos desde 2008, eventos climáticos como la sequía de 2016 volvieron a aumentarla (RAM, 2016).

Para ponernos en situación, la Unión Europea en su conjunto es importadora de energía, aunque la media europea se encuentra muy por debajo de la española. En 2020, la media de dependencia energética europea se situaba en 58% (Consejo de la Unión Europea, 2020). Esto deja en mala posición energética-económica al país, ya que somos fuertemente dependientes de conflictos geopolíticos y otras diversas crisis climáticas, así como de posibles variaciones del mercado. Esto acrecienta la necesidad de buscar alternativas y no dejar un bien básico de hoy en día como es la energía eléctrica, en un riesgo de suministro y a precios tan altos.

Y es que a todo esto, debemos sumarle dos grandes crisis que han acontecido al mundo en los últimos años como son el Covid-19 y el conflicto entre Rusia y Ucrania. La pandemia altero el *modus operandi* productivo mundial y dejó temblando la economía mundial por las variaciones entre la demanda y la oferta, alterando drásticamente la producción ocasionando un desaceleramiento económico (Cristian Alcaraz Cobacho, 2022). Al cual, hay que sumarle la última gran crisis, la guerra entre Ucrania y Rusia. Dejando de lado temas políticos, la guerra ha hecho que Ucrania cese su actividad, siendo un emplazamiento vital para la distribución del gas por toda Europa. Cuenta con una fuerte infraestructura para la compresión y distribución de gas natural compuesta por 72 estaciones de compresión y 45 mil kilómetros de tuberías de gas. A este evento hay que sumarle que la alternativa más importante para dar salida al gas ruso, el Nordstream-2, que pretendía recorrer el Mar Báltico ha sido paralizado por Alemania como medida disuasoria. El resultado ha implicado el encarecimiento de este recurso fósil, vital para cualquier economía occidental, ya que de ella dependen de forma directa o indirecta todos los bienes y servicios.

El mix energético español no se abastece solamente por estas vías. A nivel nacional, la mayor parte de gas natural que se ha importado históricamente proviene del norte de África, desde dos gaseoductos diferentes, un conecta Marruecos y Europa, el gaseoducto Magreb-Europa y otro llega desde Argelia a Almería directamente, por donde se importa la mitad del consumo anual de gas natural del país (CNMC, 2018). Pero conflictos geopolíticos entre Marruecos y Argelia, y el cambio de postura del estado por el Sahara, también acaban salpicando al país encareciendo este recurso y cambiando los proveedores de gas natural este último año, siendo EE. UU. el principal proveedor durante el último año con un 30% (Carlos R. Cózar, 2023).

En resumen, la subida del precio del megavatio hora se debe a los factores previamente mencionados, escasez de recursos, aumento de la demanda y tensiones internacionales en los países que suministran nuestra energía, y esto afecta a todo el conjunto de la población española. En el siguiente gráfico se muestra la evolución del precio del megavatio hora (Figura 5) desde 2010, donde se aprecia una fuerte subida, desde 2020 el precio del megavatio hora se ha multiplicado por seis.

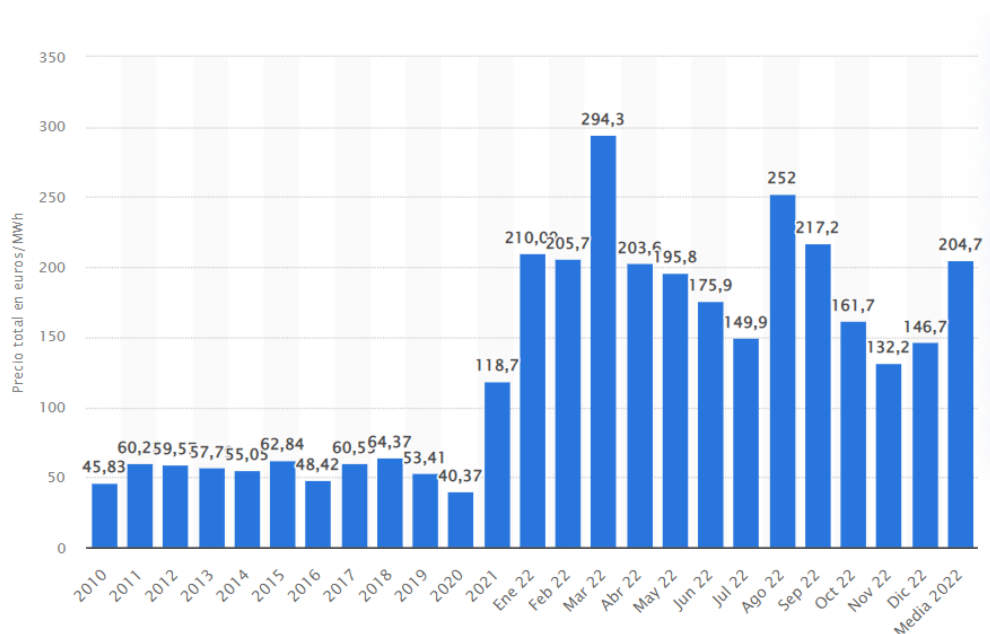


Figura 5. Gráfico evolución euros/MWh. Fuente: Statista.

Esta subida de precios, junto con la alteración de la producción, se ha visto reflejada directamente en la economía del país, por ejemplo, dejando una bajada del -11,2% en el PIB en el 2020 (INE, 2022), además de provocar fuertes crisis como la Crisis del Acero. Todo esto ha contribuido a aumentar la tasa de paro hasta un 13,5% en el año 2021 (INE, 2022), valores parecidos a los obtenidos en 2009 y 2010 tras la última gran crisis nacional.

Para frenar esta tendencia, se buscado una alternativa como esta, que permitirá producir energía limpia mediante un combustible más barato, y que no se prevé que deje de serlo a largo plazo debido a su alta cantidad de reservas y su mayor facilidad de extracción. De esta manera se pretende reducir el coste eléctrico, la dependencia energética y se fomentaría la creación de numerosos puestos de trabajo, revirtiendo la tendencia negativa que vivimos hoy en día. Además de fomentar un mix variado y sostenible que permita asegurar el abastecimiento y estar protegidos frente a crisis tanto ambientales como geopolíticas.

2. Objetivos y Alcance

El objetivo principal de este proyecto es analizar la viabilidad técnica, ambiental y económica, de posibles mejoras a incorporar en las centrales térmicas de carbón convencionales. El estudio de viabilidad se desarrolla para las centrales que se encuentran dentro del marco nacional, posteriormente dichas mejoras serán extrapolables al resto de centrales de carbón. Mediante este, se pretende buscar una alternativa a corto plazo para la generación que permita mitigar los aspectos mencionados anteriormente en el contexto, como la dependencia energética y los importantes impactos ambientales asociados a estas.

A nivel técnico, se buscará implementar en las ya obsoletas centrales de carbón, medidas correctoras que permitan aumentar su eficiencia y sostenibilidad. Dentro de estas medidas correctoras, también se cuenta con modernizaciones que permitan mejorar el desempeño ambiental de esta central. Para ello, nos basaremos en las Mejores Técnica Disponibles en la actualidad, técnicas actuales viables y sostenibles.

Para llevar a cabo el análisis ambiental, se llevará a cabo un estudio de impactos. Para ello se definirán las fases del proyecto y los factores afectados por él. Se realizará una comparación con otras alternativas con unos criterios comunes y alineados con el contexto de este proyecto. Una vez escogida la mejor alternativa, se hará un análisis de impactos mediante matrices causa-efecto como la matriz de Leopold, y una valoración cualitativa y cuantitativa del impacto.

Por último, se estudiará la viabilidad económica y así quedar alineados con el nuevo enfoque a futuro basado en el desarrollo sostenible. Este se llevará a cabo mediante un Coste Nivelado de la Energía (LCOE, siglas en inglés) que nos permite comparar diferentes formas de generación de energía a partir de unos parámetros económicos. De esta forma obtendremos un dato de coste por unidad de energía teniendo en cuenta toda la vida útil de la central.

3. Análisis del Estado del Arte

En este apartado, primero comprenderemos cómo funciona una central térmica de carbón. Comprenderemos el ciclo de transformación de energía y las entradas y salidas al sistema. Luego se detallarán las medidas correctoras que se proponen para mejorar el desempeño ambiental de la central, junto con técnicas que permitan optimizar la eficiencia de esta.

3.1 Centrales convencionales

Las centrales térmicas convencionales, también llamadas termoeléctricas convencionales, utilizan combustibles fósiles (gas natural, carbón o fueloil) para generar energía eléctrica mediante un ciclo termodinámico de agua-vapor. Estas centrales funcionan a partir de la generación de vapor que mueve una turbina conectada a un generador eléctrico. La energía producida en la central es transmitida a través de la red eléctrica para su distribución a los consumidores. El término 'convencional' se emplea para diferenciarlas de otras centrales térmicas, como las de ciclo combinado o las nucleares.

En cuanto a las centrales de carbón que podemos encontrar hoy en día, lo normal es encontrarnos con centrales de tecnología ultra-supercrítica frente a la subcrítica o supercrítica, ya que es más eficiente. Esta eficiencia también se puede mejorar empleando carbones de mayor calidad, es decir, con mayor poder calorífico o mediante mejoras tecnológicas, por ejemplo, controlando el coeficiente de transferencia de calor con el aire y con procesos regenerativos y con recuperación de calor. Es cierto, que la tecnología ultra-supercrítica, es relativamente moderna, pero las centrales subcríticas y supercríticas pueden ser adaptadas tecnológicamente. A continuación, se muestra la clasificación de las centrales de carbón, que depende de la temperatura y presión de salida del vapor de la caldera (Tabla 1).

Tabla 1. Clasificación de centrales térmicas de carbón.

	Presión	Temperatura	Rendimiento
Subcrítica	13-18 MPa	<540 °C	35-40%
Supercrítica	>21,8 MPa	540-620 °C	42-44%
Ultra-Supercrítica	27-35 MPa	540-760 °C	44-48%

Durante el desarrollo de este proyecto, analizaremos la viabilidad de una central de tecnología ultra-supercrítica, ya que es la más moderna y de mejor rendimiento, y por ende, la más sostenible a lo largo de su vida útil por su menor demanda de combustible sobre todo. Además, la caldera que se empleará será de lecho fluido, aunque se profundizará en este aspecto más adelante. Las centrales ultra-supercríticas operan en puntos termodinámicos donde no existe diferencia entre los estados del agua gaseoso/vapor y líquido (Figura 6). El rango de potencia bruta que genera una central de estas características con caldera de lecho fluido oscila entre los 550 MW hasta los 800 MW (Alejandro Miguel

Pérez, 2013). Esta tecnología se desarrolló sobre todo en Japón, aunque ha sido altamente empleada a nivel internacional durante las últimas décadas por su gran eficiencia. China, Estados Unidos, Alemania, India o Italia son algunos de los países líderes en la implementación de estas centrales (Figura 7).

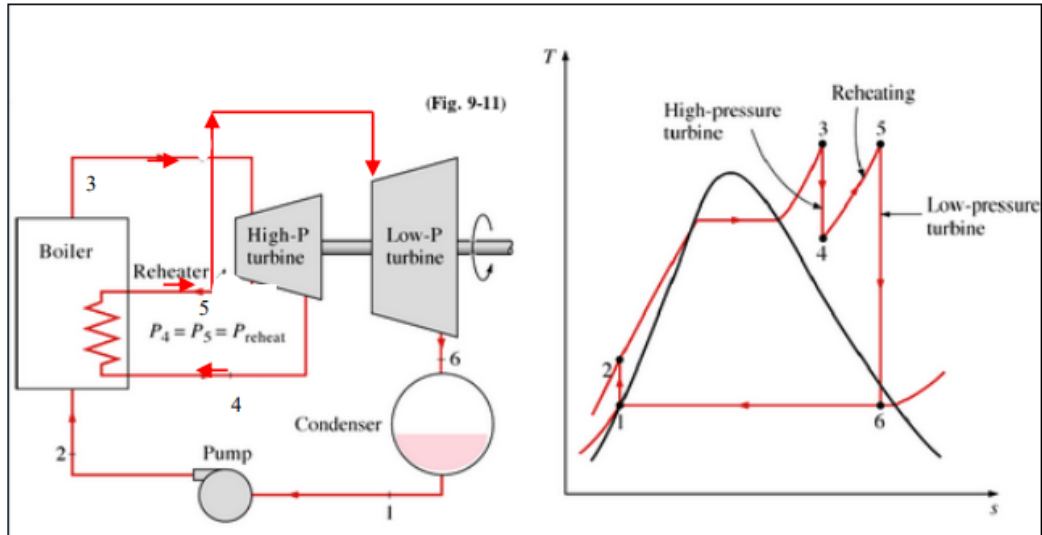


Figura 6. Ciclo de Vapor de central convencional con economizador, sobrecalentador y recalentador con su ciclo Rankine Ideal T-s. Fuente: Apuntes termodinámica UPV/EHU.

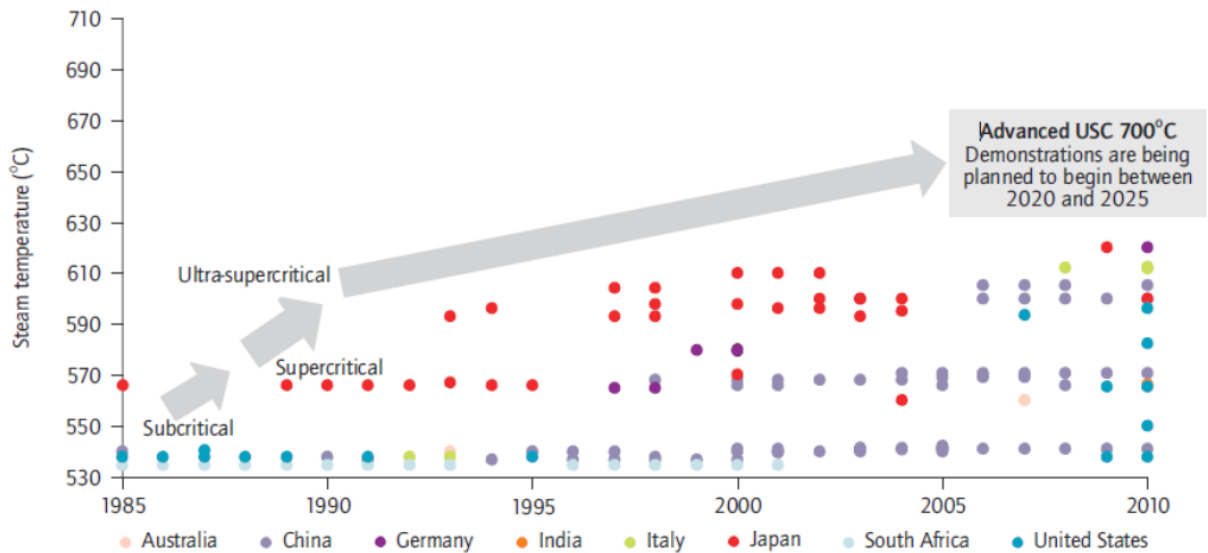


Figura 7. Estado del arte internacional de centrales de carbón. Autor: Alejandro Miguel Pérez.

A continuación, describiremos las partes que componen una central tipo de estas características:

- **La caldera** es un dispositivo que se utiliza para llevar a cabo la combustión del carbón y así generar vapor a partir del agua que fluye a través de un conjunto de tubos y serpentines. Esta máquina cuenta con varios componentes auxiliares para mejorar su rendimiento, entre ellos el precalentador, el economizador y el calentador de aire, los cuales tienen la tarea de secar el vapor, calentar el agua que alimenta la caldera y optimizar el proceso de combustión.

Ya que utiliza tecnología ultra supercrítica, la caldera funciona con una presión de vapor de salida de entre 27 y 35 MPa y trabaja a una temperatura de salida de vapor de entre 540 y 760 °C. A partir de este punto, el vapor de agua ultra supercrítico es conducido hacia la turbina de vapor. Por otro lado, los gases de combustión se desplazan hacia una tubería de salida para ser eliminados al exterior una vez tratados, después de haber calentado la caldera donde se lleva a cabo la vaporización del agua.

- En la **turbina de vapor**, que tiene una potencia entre 550 y 800 MW, se produce la transformación de la energía del vapor de agua en energía mecánica de rotación a través de los álabes durante su expansión. Estas turbinas cuentan con varias secciones para la expansión del vapor y parte de este, se extrae y utiliza para aumentar la temperatura del agua en los calentadores de alimentación de la caldera.

En las turbinas modernas, se extrae vapor y se dirige hacia los recalentadores secundarios de la caldera, donde el vapor es recalentado de nuevo antes de ser introducido en las siguientes secciones de la turbina. También puede ser redirigido a otras turbinas independientes.

- El **generador eléctrico** se conecta al eje de la turbina de vapor y gracias al movimiento rotativo de este, el alternador produce energía eléctrica de media tensión y alta intensidad. La corriente eléctrica generada se envía a un **transformador**, que tiene como función aumentar la tensión de la corriente para minimizar las pérdidas durante su transporte.

El transformador, basado en la inducción electromagnética, comúnmente está compuesto por un núcleo de hierro dulce y dos conductores enrollados: el primario y el secundario. El primario es por donde circula la corriente que se va a transformar y el secundario es donde se produce la corriente eléctrica a alta tensión y baja intensidad.

- Otra parte importante de las centrales convencionales de carbón, son las **tecnologías de depuración de gases y control de emisiones**. Deben de controlarse, sobre todo, las emisiones asociadas a los compuestos de óxidos de azufre y nitrógeno, y las partículas.

Para el caso de las partículas sólidas, podemos encontrar diferentes equipos. Si hacemos una clasificación por tamaño de partículas, podemos encontrar dos grandes grupos: para partículas pequeñas, PM_{2,5} y partículas grandes PM₁₀.

Enfocados en separar partículas más pequeñas podemos encontrarnos con electrofiltros y filtros de mangas. Los electrofiltros o precipitadores electrostáticos, cargan eléctricamente la corriente de humos húmeda que circula a través de sus placas cargadas magnéticamente. Las partículas cargadas, gracias a la atracción de las placas, salen de la corriente gaseosa y se extraen por la parte inferior de los filtros. Sin embargo, los filtros de mangas o de tela, captan partículas secas de la corriente gaseosa, al hacer pasar esta, por pequeñas secciones de poros en la tela.

Para las partículas más grandes, normalmente se emplean separadores mecánicos, como los ciclones, o de venturi (Figura 8). Los ciclones, crean vórtices por su interior que son recorridos por la corriente gaseosa que porta las partículas. En el movimiento por el interior, estas rozan y se frenan contra las paredes del ciclón y se extraen de la corriente gaseosa, que normalmente sale por la parte superior, dejando la boca inferior libre para la caída de las partículas separadas mecánicamente. Los venturi tienen un funcionamiento similar en cuanto a la creación de vórtices y separación mecánica cuando la fuerza centrífuga empuja las partículas de la corriente gaseosa hacia las paredes del separador, aunque antes dicha corriente pasa por una garganta venturi donde se humedece al atomizar el agua en el paso por la garganta.

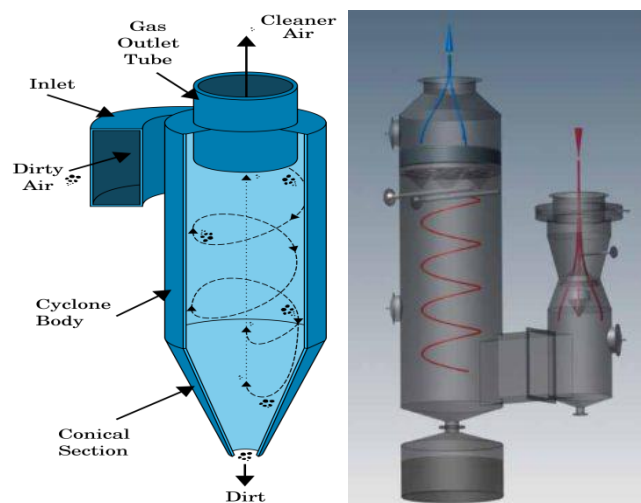


Figura 8. Separadores ciclón (izq.) y venturi (dch.).

Para el tratamiento de los óxidos de azufre y nitrógeno presentes en los gases de salida es necesario emplear otras técnicas con reacciones químicas. Comenzaremos explicando las alternativas para depurar los óxidos de nitrógeno.

Para estos destacan dos tratamientos similares, la reducción selectiva no catalítica y la reducción selectiva catalítica. Ambas técnicas se basan en inyectar la corriente de humos a depurar en un reactor SCR, y dependiendo cuál, este contará con catalizador que optimice el proceso de reducción o no, depende del tiempo de residencia necesario para lograr la depuración de los óxidos. En la industria de generación eléctrica, se suelen emplear catalizadores de metales básicos, como el vanadio y el

tungsteno, que, aunque carecen de una alta durabilidad térmica, son menos costosos y tienen una alta eficiencia en los rangos de temperaturas de aplicaciones de calderas industriales. Para lograr la reducción selectiva no catalítica, se emplean los agentes reductores amoníaco y urea, sin embargo, gracias al catalizador disponible en el reactor SCR de la reducción catalítica, sólo es necesario emplear como agente reductor el amoníaco.

Los productos de la reacción de reducción para los óxidos de nitrógeno son nitrógeno gas y agua, aunque en la alternativa sin catalizador, también se genera CO₂. Esta técnica de depuración de gases, aunque a diferente escala, es la misma que se emplea para depurar las emisiones de camiones y automóviles diésel.

En cuanto a las centrales de generación de carbón hay que tener especial consideración con la depuración de gases ya que existen varias limitaciones debido al envenenamiento del catalizador. Por un lado, hay que tener especial cuidado con la generación de sulfato de amonio y bisulfato de amonio debido al azufre presente en el combustible, así como el SO₂, SO₃ y O₂ presente en los gases de combustión. Por otro lado, hay que tener especial cuidado con las cenizas volantes producidas durante la combustión y que obstruyen el catalizador. Para evitar esto, es importante depurar la corriente de salida de humos antes de ser introducida en el reactor SCR. La vida útil de un catalizador SCR oscila entre los 1,8 – 4,5 años para centrales eléctricas de carbón.

3.2 Mejores técnicas disponibles

Como hemos detallado en el contexto de este proyecto, las centrales de carbón en España se encuentran en vías de extinción. Esto es debido a su alto potencial contaminante al emplear un recurso fósil que genera altas cantidades de emisiones atmosféricas perjudiciales para el medio ambiente, así como un menor rendimiento frente a otros combustibles como el gas natural.

En el anterior punto se describían las centrales convencionales térmicas de carbón, hoy en día obsoletas, pero siendo la infraestructura base donde se pretenden instalar las actualizaciones. Esas actualizaciones llegan en forma de Mejores Técnicas Disponibles (MTD) que nos permiten modernizar las centrales y convertirlas en una alternativa más sostenible a corto plazo, así como un recurso para paliar la dependencia energética y el encarecimiento de la producción de energía.

Primero nos pondremos en contexto acerca de las MTD y posteriormente en los siguientes puntos profundizaremos en aquellas técnicas que emplearemos en nuestras centrales. El marco legal europeo describe las Mejores Técnicas Disponibles como:

“La fase más eficaz y avanzada de desarrollo de las actividades y de sus modalidades de explotación, que demuestren la capacidad práctica de determinadas técnicas para constituir la base de los valores límite de emisión y otras condiciones de la autorización destinadas a evitar o, cuando ello no sea practicable, reducir las emisiones y el impacto en el conjunto del medio ambiente y la salud de las personas.”

- Directiva 2010/75/UE

Básicamente las MTD definen cómo deben llevarse a cabo las actividades industriales, que bajo las técnicas al alcance hoy en día, no tengan impactos en el medio ambiente o consigan minimizarlos al máximo, buscando un desarrollo tecnológico lo más sostenible posible. Estas directrices técnicas son un concepto de aplicación legal que regula las actividades industriales y su impacto en el medio ambiente, no son sólo recomendaciones. El marco jurídico que engloba afecta a todos los países pertenecientes a la Unión Europea y sólo a ellos, no tiene carácter internacional. Adaptarse a estas técnicas es imprescindible para evitar sanciones económicas y demás penalizaciones, como ceses de actividad o clausura de instalaciones.

3.2.1 Marco Legal en Europa y España

El concepto MTD surge por primera vez en 1996 en la Directiva 96/61/CE, que recibe el nombre de Directiva de Prevención y Control Integrado de la Contaminación o Directiva IPPC (*Integrated Pollution Prevention and Control*). Posteriormente, la Directiva 2008/1/CE de la Comunidad Europea aunó la directiva original con las sucesivas modificaciones y otras directivas de este carácter; Directiva de Grandes Instalaciones de Combustión, Directiva de Incineración de Residuos, Directiva de Compuestos Orgánicos Volátiles, Directivas sobre Óxidos de Titanio. Así se consiguió una nueva directiva clara y racional para legislar las actividades industriales con más impacto. Por último, a nivel europeo, en 2010 entra en vigor la Directiva de Emisiones Industriales (Directiva 2010/75/UE), en la que las MTD se consideran de obligado cumplimiento, ya que en la IPPC estas técnicas eran una referencia.

Este cambio de “referencia” a “obligado cumplimiento” supuso un antes y un después en el sector industrial, y dio pie a un nuevo concepto de documentos de referencia, los documentos BREF (*Best Reference Document*). Además, propició la aparición de los Valores Límites de Emisión (VLE) basados en las conclusiones a partir de las MTD. Estas Conclusiones-MTD deben realizarse en un plazo de 4 años, y evitar así, desequilibrios entre las MTD y los VLE en estados miembros de la Unión Europea. En cuanto a los documentos BREF, estos deben elaborarse y actualizarse según la Directiva 2012/119/UE, donde además se designa al European IPPC Bureau (EIPPCB) como la entidad responsable más directa de gestionar la elaboración y actualización de los BREF, aunque el poder final como entidad máxima regulatoria pertenece a la Comisión Europea.

A escala nacional, es el Ministerio para la Transición Ecológica (MITECO) el encargado de llevar a cabo la transposición de la Directiva de Emisiones Industriales (DEI). La transposición de esta directiva es el Real Decreto 815/2013 y el Real Decreto Legislativo 1/2016. En él se dicta, que son las comunidades autónomas las que regulan con mayor grado y las competentes para conceder la Autorización Ambiental Integrada (AAI), así como su control. Son las comunidades autónomas las encargadas de velar por la adaptación de la DEI y las Conclusiones MTD en cada sector, así como la aplicación de la C-MTD de corte horizontal que deban considerarse en base a los procesos de cada instalación.

3.2.2 Documentos MTD

Oficialmente, la información de las Mejores Técnicas Disponibles se plasma en dos tipos de documentos:

- Documentos de referencia MTD o documentos BREF que son los que recogen toda la información relativa a las MTD como:
 - Técnicas aplicadas
 - Emisiones actuales
 - Niveles de consumo
 - Técnicas que se tienen en cuenta para determinar las MTD
 - Técnicas emergentes
 - Conclusiones de las MTD
- Conclusiones sobre las MTD o BAT *Conclusions* donde se recogen las conclusiones de los documentos BREF en cuanto a:
 - Ámbito de aplicación, definiciones y consideraciones generales
 - Criterios para la evaluación de su aplicabilidad
 - Conclusiones sobre las MTD generales (como sistema de gestión ambiental, gestión energética, control de proceso emisiones difusas, vigilancia de emisiones a la atmósfera, y de los vertidos, olores, ruido)
 - Niveles de emisión asociados a las MTD
 - Monitorizaciones
 - Niveles de consumo

3.3 Unidad separadora de aire

La Unidad de Separación de Aire (ASU) es un elemento clave en los procesos de oxidación, ya que es la etapa que más penaliza el rendimiento energético de la planta. Tiene la función de separar el oxígeno del aire, para poder llevar a cabo una combustión con oxígeno puro (>95%), obteniendo así un producto gaseoso de alta concentración en CO₂. Para la separación del aire, debido a la alta demanda de oxígeno en una planta de combustión, se emplearán columnas de separación criogénicas. Podemos observar el diagrama de flujo de una unidad tipo a continuación (Figura 9):

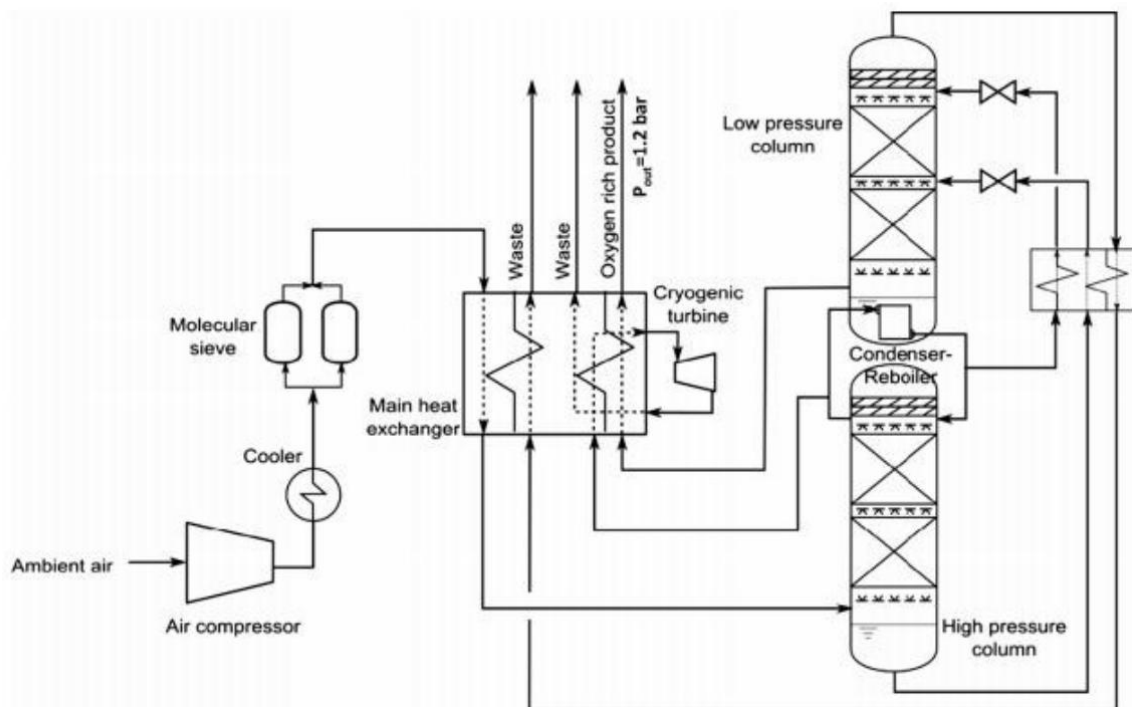


Figura 9. Esquema planta separadora de aire mediante método Linde-Thompson.

Estas unidades separadoras de aire son un equipo diseñado a partir del modelo de Linde (1902) y se basa en destilar el aire a muy bajas temperaturas, de ahí el nombre de destilación criogénica. La corriente de aire se comprime y filtra para aumentar su pureza al máximo antes de ser introducida al intercambiador de calor, donde alcanza temperaturas de $-190\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Pablo Cerrada Martínez, 2017) gracias a los procesos de expansión y compresión.

La compresión del aire es un proceso energética y mecánicamente exigente. Para la compresión, es común emplear compresores de varias etapas con intercambiadores de calor para evitar temperaturas demasiado altas y ocasionar fallos mecánicos en el compresor. Este proceso de compresión es imprescindible, ya que sin aumentar la presión, la temperatura de ebullición del aire no descendería lo suficiente para licuar el oxígeno, ni se podría expandir para enfriarlo y alcanzar las temperaturas deseadas antes de entrar a la columna de destilación de alta presión (5 bar). La expansión es importante no sólo para la licuefacción de una fracción del aire, sino que también, en su proceso de expansión, produce energía que compensa parte de la demanda del compresor, reduciendo el coste energético de la planta.

La corriente enfriada se introduce a la columna de destilación de alta presión, y es enfriada aún más ya que circula por un serpentín en contacto con el líquido enriquecido en oxígeno que hierve en el fondo de la columna. El calor para la ebullición del oxígeno se obtiene de la propia corriente de aire entrante. El líquido con un 40% de oxígeno de la cola de la columna de destilación de alta presión se recircula a la columna de baja presión (1 bar), donde se produce la destilación propiamente dicha, extrayendo por cabeza el nitrógeno y por cola el oxígeno de alta pureza. Por último, parte del producto condensado en cabeza de la columna

a alta presión se emplea como reflujo de la propia columna, y la otra parte se recircula a la cabeza de la columna de baja presión. Así, parte del nitrógeno realimentado hará de reflujo en la columna de baja presión y parte escapará como producto por la cabeza de la propia columna (Javier Pamos Serrano, 2013).

3.4 Caldera de lecho fluidizado

Las calderas de lecho fluido se llevan empleando décadas en la industria de producción de vapor, por lo que es una tecnología avanzada y moderna dentro del mundo de las calderas de vapor. Estas pueden ser de lecho fluido burbujeante y de lecho fluido circulante. En ellas, la combustión se lleva a cabo de manera controlada dentro del hogar de caldera y en el sistema de recirculación. Se consigue así, bajas temperaturas que permitan aumentar el tiempo de residencia de las partículas de ignición en comparación con las calderas de carbón pulverizado, pudiendo emplear combustibles de menor calidad o menos poder calorífico, reduciendo costes de generación y flexibilidad frente a los diferentes combustibles.

Estas calderas, son ideales para continuar con la producción de energía mediante combustibles fósiles reduciendo considerablemente los impactos por emisiones de gases. Por un lado, la temperatura de funcionamiento de la caldera se encuentra por debajo de la de formación del NO_x por lo que se reduce considerablemente la formación de este, responsable de efectos contaminantes como la conocida lluvia ácida. Además, los carbones empleados, aunque sean de alta calidad, contienen compuestos de azufre, que durante la combustión producen óxidos de azufre, los cuales deberíamos eliminar para hacer frente a las legislaciones ambientales, con el coste de operación que ello supone. Sin embargo, al emplear sorbentes como la roca caliza en el propio lecho fluido, el azufre es eliminado en forma de yeso que se expulsa junto con las cenizas. Como resultado de emplear este tipo de calderas, la reducción de formación de gases contaminantes se reduce en torno al 90% (Javier Hernández Rodríguez, 2017).

Estas calderas de lecho fluido (Figura 10), además de ser más favorables desde un punto de vista ambiental, también suponen una serie de ventajas de cara al mercado:

- Admiten el uso de combustibles de menor calidad e independiente del azufre que contengan, por lo que podemos optar por combustibles más baratos.
- Gran flexibilidad a la hora de consumir combustible de distinto diseño y hacer frente a las variaciones del propio mercado sin alto riesgo.
- Buen índice de uso del sorbente, tiene una eficiencia de desulfuración máxima del 95%.
- Simples en cuanto al diseño y operación.
- Coste de inversión moderado y buena eficiencia energética frente.
- Baja necesidad de mantenimiento.

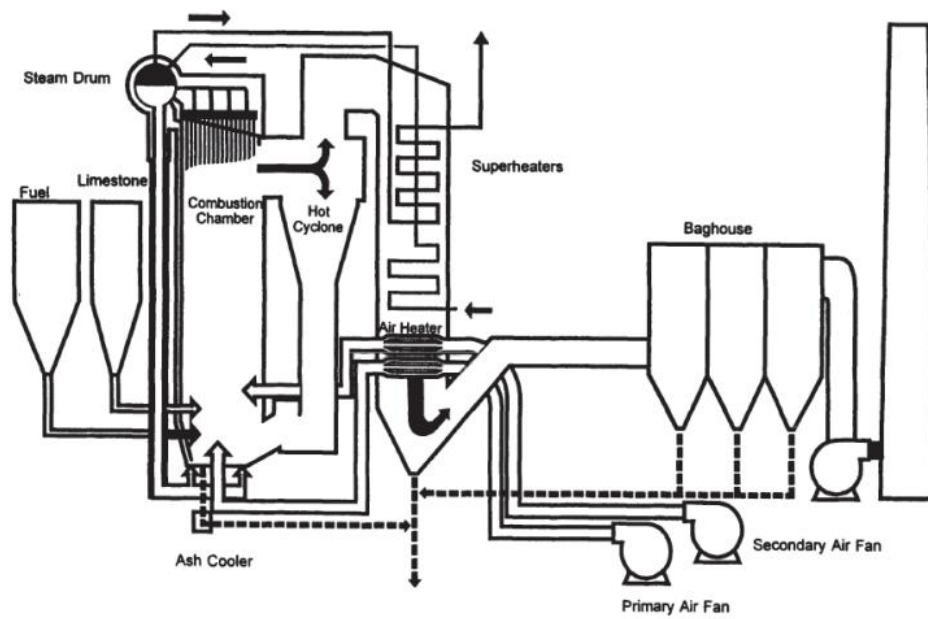


Figura 10. Esquema de una caldera de lecho fluidizado. Fuente: Javier Hernández Rodríguez.

3.4.1 Lecho de la caldera

En este tipo de calderas, la principal diferencia frente al resto es que el lecho se encuentra en la parte inferior del hogar. Aquí se encuentran las partículas inertes que propician la transferencia del calor al fluido. Debido a las condiciones de flujo, las partículas junto con los gases que se implementan forman un lecho con características propias de un fluido, de ahí su nombre. Para mantener un lecho constante, el lecho cuenta con un sistema de alimentación constante que supe la extracción de las cenizas sobrantes, además de la recirculación de parte del material inerte una vez haya realizado su labor transfiriendo el calor. Parte de las partículas es devuelta al lecho por descenso por las paredes del hogar. El resto, se recircula después de hacerse pasar por un ciclón que las separe de los gases presentes en la caldera. Además, estas partículas realizan también la labor de captura de azufre que se encuentra presente en los gases de combustión.

3.5 Oxidación

La idea principal de este método de combustión, parte de la base de emplear oxígeno puro o en muy alta concentración en exceso como comburente, en vez de emplear aire como en la combustión convencional. Gracias a esto, se obtiene mayoritariamente dióxido de carbono y vapor de agua como resultado de la combustión. Esto abre la posibilidad de llevar a cabo la captura de CO₂ mediante una sencilla condensación y evitar emisiones de efecto invernadero a la atmósfera.

Gracias a que el comburente sea oxígeno casi puro y que el dióxido de carbono tenga mayor densidad que el aire, hace que el volumen de gas producido decrezca, permitiendo el uso de calderas más pequeñas, ahorrando materiales y espacio para una misma producción. La diferencia entre los gases producidos y empleados en la combustión convencional y la oxidación se traduce en las siguientes diferencias (con oxidación):

- Menor intercambio de calor.
- Menor temperatura de la llama.
- Estabilidad menor.
- Eficiencia del proceso mayor.
- Menores emisiones contaminantes.

Aunque las diferencias negativas como el menor poder de llama o la estabilidad se solucionan introduciendo oxígeno en exceso para la combustión.

La combustión se lleva a cabo en atmósferas ricas en oxígeno y gases recirculados. Se reemplaza el N₂ como gas inerte por el CO₂ que provoca que la llama sea menos brillante debido a su mayor absorción de la radiación. Otra diferencia en cuanto a la llama se refiere, es que son más compactas que en los métodos convencionales, que supone una menor estabilidad de la llama, que como hemos mencionado antes, se soluciona introduciendo oxígeno en exceso durante la combustión. Este aporte de oxígeno extra mejora la calidad de la combustión en cuanto al aporte de calor, aunque aumenta la tasa de formación de óxidos de nitrógeno, ya que el combustible también puede contener nitrógeno que se libera en el momento de la combustión, aunque es mucho menor su formación respecto de los métodos convencionales.

Para comprender las dificultades en cuanto a la compactidad, brillantez y estabilidad de la llama podemos observar la siguiente figura (Figura 11). A la izquierda podemos ver la llama característica de los métodos de combustión más tradicionales. En la del medio, se observa como la ignición de la llama se produce con retraso con respecto al inicio del quemador, que se soluciona en la tercera imagen, añadiendo oxígeno en exceso. De esta manera podemos emplear combustibles menos volátiles o antracita, que son los combustibles cuyo uso conlleva más problemas en cuanto a la estabilidad de la llama.

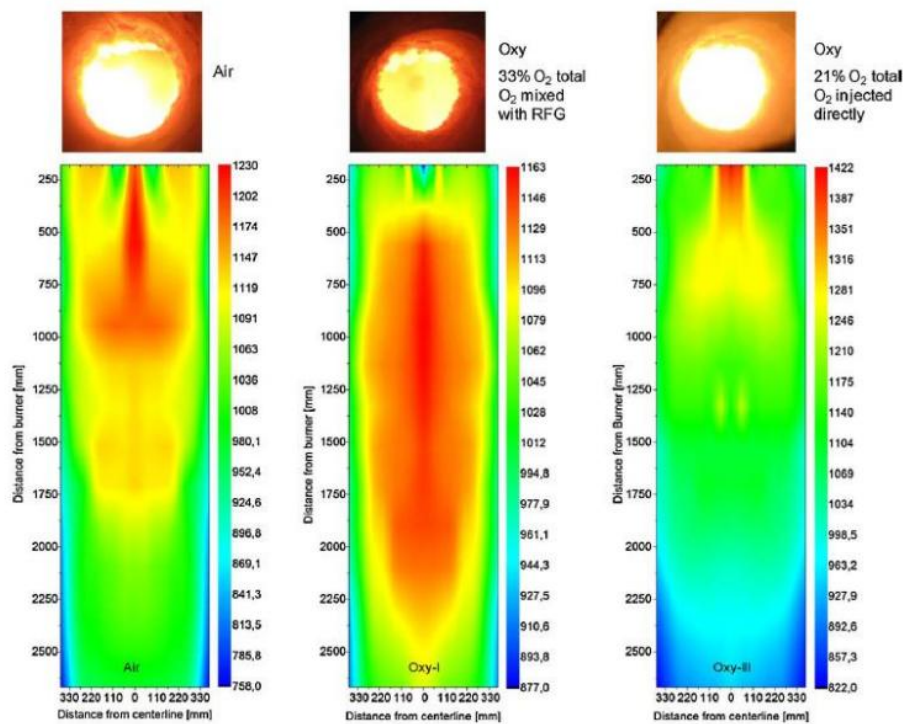


Figura 11. Comparativa de llamas (izq. a dch.) convencional - oxicomustión sin exceso de oxígeno - oxicomustión con exceso.

3.6 Captura de CO₂

La captura de este gas en las centrales de oxicomustión, es sencilla generalmente, ya que gracias a realizar la combustión con oxígeno puro, el producto es principalmente vapor de agua y CO₂. Teniendo en cuenta que las temperaturas de condensación de ambos gases son muy diferentes, con una condensación simple podríamos lograr composiciones de hasta un 99% de CO₂. Es cierto que al no emplear oxígeno puro (95%), y las trazas de nitrógeno y azufre en la corriente de gases de salida de la combustión necesitamos llevar a cabo un pequeño tratamiento de estos gases con los métodos anteriormente explicados, aunque la exigencia del tratamiento no será tan dura como con las centrales convencionales más antiguas.

Finalmente, antes de continuar con el ex-post del CO₂, podemos observar un esquema general mediante un diagrama de flujo de una central reconvertida a oxicomustión (Figura 12).

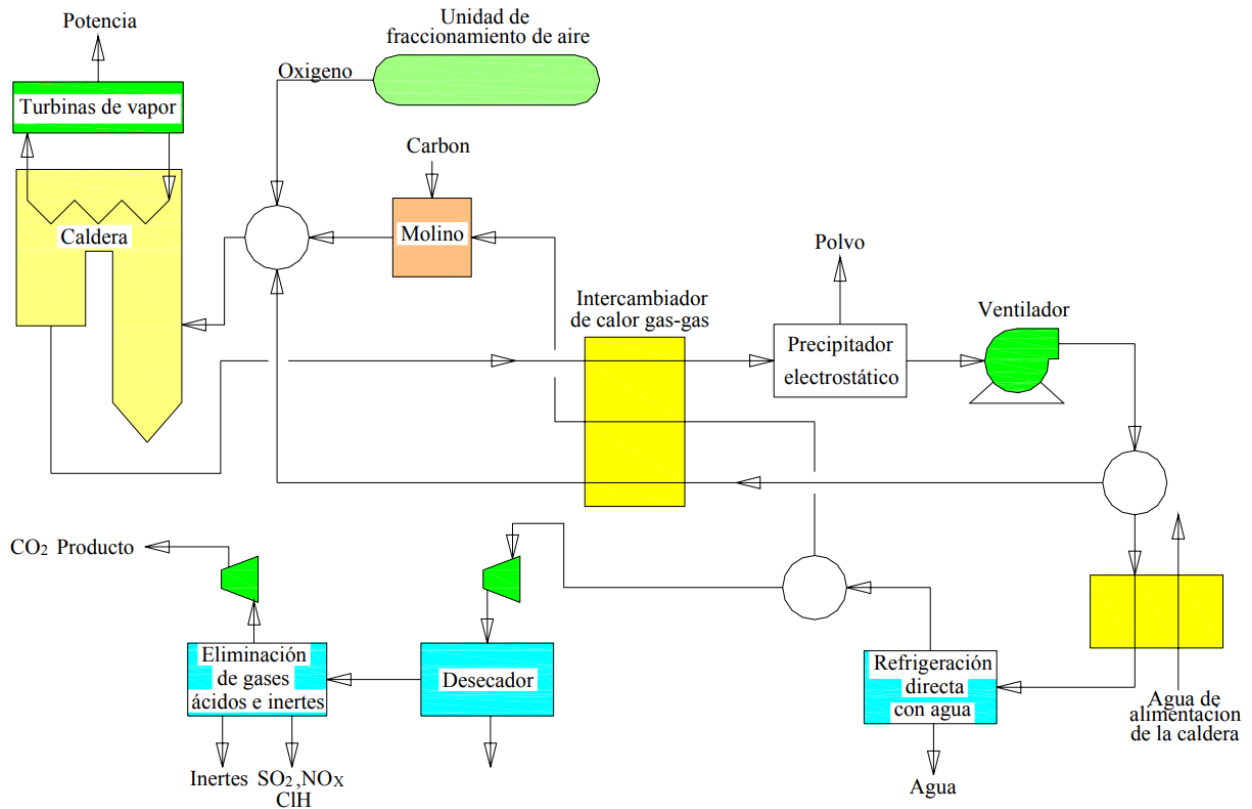


Figura 12. Esquema de central convencional reconvertida a oxidación.

Según estudios realizados acerca de la reconversión de centrales de carbón pulverizado supercríticas a oxidación (Dillon *et al.*, 2005), la eficiencia térmica del ciclo, resulta en una pérdida de 8,8 puntos (44,2% a 35,4%) y la potencia neta de la planta se ve reducida de 677 MWe a 532 MWe. Aunque si tenemos en cuenta un estado ultra-supercrítico ($\approx 48\%$) de funcionamiento el rendimiento final de la planta sería en torno al 40%. Como se puede comprobar en el esquema de la central, la corriente gaseosa de salida se divide en tres: una se recircula para reducir la temperatura en la combustión, otra se emplea como gas de transporte y secado para el carbón de alimentación, y por último la corriente gaseosa como producto. Las calderas no son perfectamente herméticas y puede llegar a penetrar algo de aire, además del propio que entra después de la ASU (95% O₂), por ello se debe implementar una unidad separadora de inertes antes de recoger la corriente gaseosa producto, además, en ella se implementan también los separadores de gases ácidos aunque menos exigentes que en las antiguas centrales, ya que el producto de combustión tiene una mucha menor composición de estos y es más fácil alcanzar composiciones dentro de los límites de emisión.

3.7 Almacenamiento de CO₂

Gracias a la implementación de la oxidación y la caldera de lecho fluidizado, la corriente de salida de gases de combustión es rica en CO₂ y vapor de agua, que después de una sencilla condensación, se obtiene un flujo gaseoso con una concentración en dióxido de carbono del 99%. Gracias a esto, el producto gaseoso final puede ser almacenado para su uso posterior en diferentes industrias, como la extractora de combustibles fósiles, como refrigerante o en la industria química. Existen varias formas de almacenamiento, a continuación destacamos las tres más empleadas actualmente:

- Almacenamiento geológico. Dentro de este tipo de almacenamiento existen tres posibilidades: yacimientos de petróleo gas, formaciones salinas profundas y capas de carbono inexplotables. Las formaciones que antiguamente han retenido fluidos, como rocas porosas, son candidatas potenciales para el almacenamiento geológico de CO₂. Por otro lado, se encuentra en vías de investigación el almacenar el dióxido de carbono en yacimientos de carbono para aumentar la formación de metano.
- Almacenamiento oceánico. Esta alternativa trata de inyectar el CO₂ capturado en los fondos oceánicos a una profundidad mayor de 1000 metros. Mediante gaseoductos o buques, esta corriente se inyecta en los fondos marinos para después, disolverse y pasar a formar parte del ciclo del carbono natural.
- Carbonatación mineral y usos industriales. La primera, consiste en realizar reacciones químicas de carbonatación y así conseguir carbonatos sólidos inorgánicos. La segunda consiste en emplear el dióxido de carbono como materia prima para crear sustancias que contienen carbono. Por último, teniendo en cuenta la inercia general para acabar con los HFC's como compuesto refrigerante, parece que el dióxido de carbono puede ser un importante candidato para ocupar su lugar.

4. Análisis de viabilidad

A continuación, comenzamos con el análisis de viabilidad ambiental, social y económica, aunque esta última se verá reforzada en apartados posteriores. Este análisis se llevará a cabo en sucesivos pasos, primero debemos determinar los factores a los que afecta nuestro proyecto, como pueden ser el medio biótico, la población o la economía. Seguido, debemos plantear las acciones que se llevarán a cabo para poder desarrollar el proyecto, como la obra civil o la implantación de sistemas de captura de CO₂. Posteriormente valoraremos diferentes alternativas de proyecto a realizar, y una vez escogida la mejor alternativa, debemos asignar los pesos pertinentes a los factores afectados por la actualización u otras alternativas para la central en función de su afección e importancia relativa.

4.1 Acciones del proyecto

En la elaboración de un proyecto de cualquier instalación de producción energética han de distinguirse tres fases según el grado del hito proyectado. Las tres fases en orden cronológico son: construcción de la instalación, operación de la central y desmantelamiento o de abandono.

4.1.1 Fase de instalación

El fin de la primera fase del proyecto es exponer las acciones que se van a desempeñar con el objetivo de montar y generar la infraestructura necesaria para poder llevar a cabo la actividad deseada.

- Delimitación del terreno.
- Movimiento de tierras y acondicionamiento del terreno.
- Apertura y cierre de zanjas para canalización.
- Transporte y maquinaria.
- Cimentación y hormigonado.
- Construcción unidad separadora de aire.
- Construcción canalizaciones y captura de CO₂.
- Instalación de la caldera.
- Planificación del abastecimiento (agua, electricidad, etc.)
- Pruebas de funcionamiento.

Una vez terminada esta fase, dará comienzo la fase de producción donde se generará electricidad, además de residuos y emisiones que se deben tener en cuenta.

4.1.2 Fase de producción

Comienza en este punto lo que se conoce como vida útil de la central. Durante esta el objetivo es generar electricidad para paliar la crisis energética actual, con la menor cantidad e impactos posibles. Es la más crítica, ya que el funcionamiento continuado durante 25-50 años puede acumular fuertes impactos que, aunque de baja intensidad, con el transcurso de los años adquieran una magnitud importante. Las fases características de esta instalación son las siguientes:

- Extracción del carbón.
- Transporte hasta planta del carbón.
- Puesta en marcha.
- Gestión unidad separadora de aire.
- Generación de vapor y electricidad.
- Exportación CO₂.
- Gestión de cenizas y otros residuos y emisiones.
- Mantenimiento de la planta.

4.1.3 Fase de desmantelamiento

Esta última fase comienza cuando la vida útil de la central llega a su fin. Es una de las fases más importantes en el proyecto, su objetivo se centra en intentar aprovechar el máximo potencial de recuperación, reciclaje y valorización de los materiales y equipos empleados durante las fases anteriores. Esto último es de vital importancia para reducir al máximo el impacto ambiental de la central.

Además, es importante que el terreno sobre el que se realizó la actividad y los terrenos empleados para el desarrollo de esta, como las minas de carbón, queden controlados y estables para no perjudicar futuras actividades e impactar en el medio.

- Desmantelamiento de la infraestructura.
- Desmantelamiento de grandes equipos.
- Retirada de materiales.
- Clausura de minas.
- Restaurar el suelo y reforestar el terreno.
- Gestión y tratamiento de residuo.

4.2 Identificación y valoración de factores

En este apartado se realizará la valoración de los diferentes factores susceptibles a la actualización de una central térmica de carbón. Estos factores hacen referencia a cualquier tipo de repercusión ya sea negativa o positiva e incluye desde los factores de carácter más ambiental hasta los económicos y sociales.

Haciendo sobre todo uso de las acciones del proyecto descritas anteriormente, se ha estudiado el conjunto de factores que de una u otra manera se ven afectados por el proyecto.

En la Tabla 2 se muestran los factores considerados afectados en este proyecto.

Tabla 2. Factores afectados por el proyecto.

1. Subsistema físico natural	Medio inerte	Aire Clima Tierra Aguas continentales
	Medio biótico	Vegetación y flora Fauna
2. Subsistema perceptual	Medio perceptual	Intervisibilidad Paisaje intrínseco
3. Subsistema población y poblamiento	Uso del suelo rústico	Uso recreativo Uso productivo
	Estructura urbana	Planeamiento urbanístico
4. Subsistema socioeconómico	Población	Dinámica poblacional Estructura poblacional
	Economía	Renta Actividades y relaciones económicas
5. Subsistema núcleos e infraestructuras	Infraestructuras y servicios	Infraestructura viaria Infraestructura no viaria

4.3 Examen de alternativas

Una vez determinadas las acciones y factores afectados, se realizará una comparación entre las alternativas posibles dentro del marco de este proyecto para actualizar las ya obsoletas centrales térmicas de carbón. Se han considerado cuatro alternativas posibles que se describirán a continuación. Para ello se escogerán una serie de criterios comunes a las cuatro alternativas desde diferentes puntos de vista.

4.3.1 Descripción de las alternativas

- **Alternativa 0. Mantener las centrales en su estado actual.** Esta alternativa trata de no hacer nada y que las centrales permanezcan en su estado actual. Por lo tanto, los terrenos no se inmutan y los impactos debidos a la incorporación de nuevos equipos y materiales, así como sus obras, no tendrían lugar. Aunque considerando que debido a su alto potencial contaminante todas las centrales de carbón se encuentran en fase de clausura o se espera antes del 2030 a nivel nacional.
- **Alternativa 1. Actualización con captura de CO₂.** Esta alternativa trata de actualizar las centrales de carbón existentes en España mediante tres medidas principales como son, la separación de aire y oxidación, la caldera de lecho fluidizado y la captura de CO₂ final. De esta manera los impactos durante su vida útil serían mínimos compensando los impactos de las nuevas instalaciones y produciendo energía sin emisiones de efecto invernadero.
- **Alternativa 2. Conversión a gas natural.** Esta alternativa trata de cambiar la morfología de la central para adaptarse a otro combustible como es el gas natural. Aunque este combustible debería ser importado perdiendo mucho rendimiento socioeconómico durante su vida útil y emitiendo grandes cantidades de gases de efecto invernadero en la generación eléctrica.
- **Alternativa 3. Implantación de cogeneración.** Esta alternativa trata de aprovechar el calor residual del proceso de generación eléctrica para otras actividades aprovechando alrededor del 90% de la energía primaria. Puede emplearse para calefacción, sistemas de refrigeración, etc. y aunque su inversión es elevada, y depende de la cercanía de las centrales actuales a los puntos de consumo, no cabe duda de que para las próximas nuevas centrales será imprescindible. Además, puede combinarse con procesos de generación renovable como la solar térmica.

Para poder hacer una comparación, los criterios escogidos son los siguientes (Tabla 3):

Tabla 3. Criterios de evaluación de alternativas.

Ámbito	Criterio
Natural	No emisión de GEI
Natural	No emisión de NO _x y SO _x
Natural	No emisión partículas
Natural	No afección al terreno
Socioeconómico	Creación de empleo
Socioeconómico	No importación de combustible
Socioeconómico	Inversión inicial
Socioeconómico	Coste de operación
Socioeconómico	Seguridad de abastecimiento energético
Socioeconómico	Aceptación pública

Los criterios se han escogido según la influencia de las alternativas propuestas acerca de los tres pilares de la sostenibilidad, la sostenibilidad social, económica y ambiental. Se han escogido los factores a los que más afección puede causar las cuatro alternativas. Luego, se han tenido en cuenta criterios económicos como la inversión o el coste de operación. Además también se han tenido en cuenta factores como la importación del combustible para hacer hincapié en la independencia energética y los conflictos geopolíticos asociados a estos combustibles fósiles, así como la aceptación pública que acoge no sólo la opinión popular acerca de proyectos de alto potencial de impacto ambiental sino la creación de empleo entre otros.

4.3.2 Métodos de valoración

A continuación, emplearemos varios métodos para valorar cuál de las cuatro alternativas propuestas es más sostenible frente a los criterios propuestos. Estos criterios están vinculados directamente con el objeto de este proyecto y se centran tanto en aspectos ambientales como en los socioeconómicos, y buscar así, la alternativa más sostenible desde todos los puntos de vista.

- Método simple de ordenación.

Es el método más sencillo, y consiste en puntuar del 1 al 4, ya que son cuatro alternativas, el impacto de cada una según cada criterio. El cuatro corresponderá a la mejor alternativa frente a cada criterio. A continuación se muestra la tabla con las puntuaciones de cada alternativa:

Tabla 4. Puntuaciones según método de puntuación única.

Ámbito	Criterio	A0	A1	A2	A3
Natural	No emisión GEI	1	4	2	3
Natural	No emisión NOx y SOx	1	4	3	2
Natural	No emisión de partículas	1	3	4	3
Natural	No afección al terreno	1	1	4	1
Socioeconómico	Creación de empleo	1	3	2	4
Socioeconómico	No importación combustible	2	4	1	2
Socioeconómico	Inversión inicial	4	3	3	1
Socioeconómico	Coste de operación	3	4	1	2
Socioeconómico	Seguridad de abast.	3	4	1	3
Socioeconómico	Aceptación pública	1	1	2	4
TOTAL		18	31	23	25

Como se aprecia en la Tabla 4, según los criterios escogidos podemos comprobar como la alternativa propuesta tiene más fuerza que las demás. Esto es así ya que desde un punto de vista ambiental, la captura de CO₂ y la implementación de la oxicomustión en caldera de lecho fluidizado evita las emisiones de efecto invernadero y ácidas, aunque no se puede evitar el trabajo en las minas de extracción de alto potencial de impacto. Desde un punto de vista socioeconómico, al realizar la combustión en lecho fluido pueden emplearse carbones de menor calidad, donde entra el carbón nacional, con menores costes asociados, además de poner en funcionamiento minas cerradas y centrales paradas con la creación de empleo que esto supone. Esto también hace que se garantice la seguridad frente al abastecimiento de energía, y con la no emisión de gases de efecto invernadero, mejore la aceptación pública.

- Método de puntuación ponderada

Este método comienza con el reparto de cien puntos entre los criterios naturales y socioeconómicos, dejando el 50% para los impactos al medio ambiente, y la otra mitad para los factores socioeconómicos. Después estos puntos vuelven a repartirse entre los diez criterios. A continuación se muestran las tablas 5, 6 y 7 donde se reflejan estas puntuaciones:

Tabla 5. Reparto de punto por criterio y alternativa.

Ámbito	Criterio	Puntos	A0	A1	A2	A3
Natural	No emisión GEI	25	3	10	5	7
Natural	No emisión NOx y SOx	5	0,5	2	1,5	1,0
Natural	No emisión de partículas	5	0,5	1	3	0,5
Natural	No afección al terreno	15	2	3	8	2
Socioeconómico	Creación de empleo	5	0,5	1,5	1	2
Socioeconómico	No importación combustible	10	2	5	1	2
Socioeconómico	Inversión inicial	7	4	1,25	1,25	0,5
Socioeconómico	Coste de operación	13	2	6	1	3
Socioeconómico	Seguridad de abast.	5	1	2,5	0,5	1
Socioeconómico	Aceptación pública	10	1	3	2	4
	TOTAL	100	16,50	35,50	24,00	23,00

Tabla 6. Ponderación de las alternativas y criterios.

Ámbito	Criterio	Puntos	A0	A1	A2	A3
Natural	No emisión GEI	25	0,300	1,000	0,500	0,700
Natural	No emisión NOx y SOx	5	0,250	1,000	0,750	0,500
Natural	No emisión de partículas	5	0,167	0,333	1,000	0,167
Natural	No afección al terreno	15	0,250	0,375	1,000	0,250
Socioeconómico	Creación de empleo	5	0,250	0,750	0,500	1,000
Socioeconómico	No importación combustible	10	0,400	1,000	0,200	0,400
Socioeconómico	Inversión inicial	7	1,000	0,313	0,313	0,125
Socioeconómico	Coste de operación	13	0,333	1,000	0,167	0,500
Socioeconómico	Seguridad de abast.	5	0,400	1,000	0,200	0,400
Socioeconómico	Aceptación pública	10	0,250	0,750	0,500	1,000
	TOTAL	100	3,60	7,58	5,07	5,04

Tabla 7. Puntuación final por alternativa.

Ámbito	Criterio	Puntos	A0	A1	A2	A3
Natural	No emisión GEI	25	7,500	25,000	12,500	17,500
Natural	No emisión NOx y SOx	5	1,250	5,000	3,750	2,500
Natural	No emisión de partículas	5	0,833	1,667	5,000	0,833
Natural	No afección al terreno	15	3,750	5,625	15,000	3,750
Socioeconómico	Creación de empleo	5	1,250	3,750	2,500	5,000
Socioeconómico	No importación combustible	10	4,000	10,000	2,000	4,000
Socioeconómico	Inversión inicial	7	7,000	2,188	2,188	0,875
Socioeconómico	Coste de operación	13	4,333	13,000	2,167	6,500
Socioeconómico	Seguridad de abast.	5	2,000	5,000	1,000	2,000
Socioeconómico	Aceptación pública	10	2,500	7,500	5,000	10,000
	TOTAL	100	34,42	79,17	50,67	52,96

Las puntuaciones finales son similares a las resultantes de la puntuación simple ya que los criterios y alternativas no varían. Se respeta el orden sugerido por el método de ordenación simple, siendo la alternativa de oxidación junto con captura de CO₂ la mejor valorada.

- Método Electre

Este es el tercero de los métodos y el más fiable, ya que mediante este podemos comparar las ventajas y desventajas relativas entre las diferentes alternativas de proyecto. Este es una combinación entre los dos métodos anteriores. Para proceder con la comparación de alternativas se emplearán dos matrices, una de concordancia y otra de discordancia, que aplican de manera normalizada los valores de las calificaciones y los pesos.

Se muestra a continuación la Tabla 8 que se ha empleado siguiendo este método. La primera, la necesaria para desarrollar la matriz de concordancia, se nutre de los cálculos realizados en la puntuación ponderada.

Tabla 8. Comparación de alternativas para la matriz de concordancia.

		Comparación A0			Comparación A1			Comparación A2			Comparación A3		
		A1	A2	A3	A0	A2	A3	A0	A1	A3	A0	A1	A2
Natural	No emisión GEI	0	0	0	25	25	25	12,5	0	0	17,5	0	17,5
Natural	No emisión NOx y SOx	0	0	0	5	5	5	3,8	0	3,8	2,5	0	0
Natural	No emisión de partículas	0	0	0,8	1,7	0	1,7	5	5	5	0,8	0	0
Natural	No afección al terreno	0	0	3,8	5,6	0	5,6	15	15	15	3,8	0	0
Socioeconómico	Creación de empleo	0	0	0	3,8	3,8	0	2,5	0	0	5	5	5
Socioeconómico	No importación combustible	0	4	4	10	10	10	0	0	0	4	0	4
Socioeconómico	Inversión inicial	7	7	7	0	2,19	2,19	0	2,19	2,19	0	0	0
Socioeconómico	Coste de operación	0	4,3	0	13	13	13	0	0	0	6,5	0	6,5
Socioeconómico	Seguridad de abast.	0	2	2	5	5	5	0	0	0	2	0	2
Socioeconómico	Aceptación pública	0	0	0	7,5	7,5	0	5	0	0	10	10	10
TOTAL		7	17,3	17,6	76,6	71,49	67,49	43,8	22,19	25,99	52,1	15	45

Luego, debemos calcular los índices de concordancia (Tabla 9). Para ello, por ejemplo, para calcular el índice de concordancia entre la alternativa 0 y la alternativa 1, debemos sumar los pesos para los que la alternativa 0 es igual o superior a la alternativa 1. Y después dividir estos entre el total de los puntos de la alternativa 0, como se aprecia en la siguiente ecuación:

$$C_{1,2} = (V_{1i} \geq V_{2i}) / \sum_{i=1}^n P_j$$

Tabla 9. Matriz de concordancia.

	A0	A1	A2	A3
A0	X	0,20	0,50	0,51
A1	0,97	X	0,91	0,86
A2	0,86	0,43	X	0,51
A3	0,98	0,28	0,85	X

A continuación, calculamos gracias a los cálculos del método de puntuación simple, la mayor diferencia en la puntuación entre alternativas.

Tabla 10. Diferencias entre puntuaciones de alternativas para calcular la matriz de discordancia.

		Comparación A0			Comparación A1			Comparación A2			Comparación A3		
		A1	A2	A3	A0	A2	A3	A0	A1	A3	A0	A1	A2
Natural	No emisión GEI	-3	-1	-2	3	2	1	1	-2	-1	2	-1	1
Natural	No emisión NOx y SOx	-3	-2	-1	3	1	2	2	-1	1	1	-2	-1
Natural	No emisión de partículas	-2	-3	-2	2	-1	0	3	1	1	2	0	-1
Natural	No afección al terreno	0	-3	0	0	-3	0	3	3	3	0	0	-3
Socioeconómico	Creación de empleo	-2	-1	-3	2	1	-1	1	-1	-2	3	1	2
Socioeconómico	No importación combustible	-2	1	0	2	3	2	-1	-3	-1	0	-2	1
Socioeconómico	Inversión inicial	1	1	3	-1	0	2	-1	0	2	-3	-2	-2
Socioeconómico	Coste de operación	-1	2	1	1	3	2	-2	-3	-1	-1	-2	1
Socioeconómico	Seguridad de abast.	-1	2	0	1	3	1	-2	-3	-2	0	-1	2
Socioeconómico	Aceptación pública	-2	-1	-3	2	1	0	1	-1	-2	3	1	2
TOTAL		-15	-5	-7	15	10	9	5	-10	-2	7	-8	2

Y calculamos los índices de discordancia según la siguiente ecuación:

$$D_{1,2} = \frac{V2 - V1}{\text{Rango de escala}}$$

Quedando la matriz de discordancia de la siguiente manera (Tabla 11):

Tabla 11. Matriz de discordancia.

	A0	A1	A2	A3
A0	X	1	1	1
A1	0,33	X	1	0,33
A2	0,67	1	X	0,67
A3	1	0,67	1	X

Por último debemos hacer una comparación entre estas dos matrices, la de concordancia y la de discordancia respetando las siguientes normas:

- Si $C_{1,2} > C_{2,1}$ y $D_{1,2} \leq D_{2,1}$ -> A_1 se prefiere a A_2
- Si $C_{2,1} > C_{1,2}$ y $D_{2,1} \leq D_{1,2}$ -> A_1 se prefiere a A_2

Quedando de la siguiente manera la matriz de ordenación para la evaluación de las alternativas (Tabla 12):

Tabla 12. Comparación de alternativas.

	A0	A1	A2	A3
A0	X	A1	A2	A3
A1		X	A1	A1
A2			X	A3
A3				X

$$A1 > A3 > A2 > A0$$

Se observa una tendencia similar a los métodos anteriormente empleados. La alternativa A1 es la mejor valorada según los criterios que se encuentran en relación directa con el objeto de este proyecto y la viabilidad desde los puntos de vista ambiental, social y económico.

4.4 Análisis ambiental de la solución propuesta

Una vez escogida la mejor alternativa de proyecto para rehabilitar las centrales obsoletas del panorama nacional, comenzaremos a identificar y valorar los impactos que el proyecto lleva intrínsecos y que afectan a los factores anteriormente mencionados (Tabla 2). Para ello, pueden emplearse diferentes metodologías como las matrices de causa - efecto, los diagramas de redes o listas de control. Nosotros para realizar la evaluación emplearemos una matriz de causa – efecto denominada matriz de Leopold.

Las matrices de causa – efecto son un método de análisis cualitativo y preliminar. Para su uso, se dividen las acciones en fases y se identifican los factores afectados en el proyecto, ya sean factores afectados positiva o negativamente. Luego se asignan valores a los cruces entre acciones y factores. Por último, se exponen los factores más impactados y las acciones más impactantes.

Como ya hemos mencionado, vamos a emplear la matriz causa – efecto de Leopold. Este fue el primer método de evaluación y es generalista, que lo hace la más apropiada para este trabajo ya que analizamos las centrales del marco nacional como un conjunto de generación eléctrica, sin concretar de manera directa una ubicación o central. Este método fue desarrollado por el Servicio Geológico del Departamento de Interior de Estados Unidos en 1971, pero continúa empleándose en la actualidad. Para su desarrollo, valoraremos las acciones y factores en función de su magnitud y de su importancia.

- Magnitud (M): grado de alteración potencial de la calidad ambiental.
- Importancia (I): peso relativo de la alteración.

Una vez realizada la matriz de Leopold, ver Anexo I, podemos observar cuales son los factores más afectados por el proyecto. Esto se concluye a según el promedio aritmético entre los aspectos que afectan positiva y negativamente a cada factor:

Tabla 13. Factores más afectados negativamente.

Factor	Promedio aritmético
Aire	-24
Tierra	-18
Intervisibilidad	-14
Uso productivo	-12
Uso recreativo	-10
Infraestructura viaria	-18

El **aire** y la **tierra** son los factores ambientales más afectados (21,21% del impacto total) (Tabla 13), la minería, el transporte continuado del combustible y la obra civil son acciones que afligen considerablemente al medio ambiente, expulsando partículas y polvo, así como óxidos de nitrógeno y demás contaminantes atmosféricos. Por otro lado, estresar el medio abiótico con el fin de obtener recursos no renovables es una práctica poco sostenible como se refleja en los resultados. La **intervisibilidad** es otro gran afectado (7% del impacto total), al fin y al cabo, infraestructuras tan grandes como las centrales y las instalaciones como la columna de separación de aire perturban el medio natural. Por último, el uso del suelo por toda la infraestructura necesaria limita la capacidad de ser empleado este para otras finalidades recreativas y productivas más sostenibles. Por último, la importante **infraestructura viaria** (9% del impacto total) asociada a una actividad de estas características es extensa, ocasionando ruidos, perturbación a especies faunísticas, además de toda la

contaminación al aire con NOx y polvo, que hace que desde un punto de vista social tenga altos impactos negativos.

Tabla 14. Factores más afectados positivamente.

Factor	Promedio aritmético
Clima	21
Renta	24
Actividades y relaciones económicas	18
Infraestructura no viaria	8

Resulta curioso, pero el **Clima** (10,61% del impacto total) se encuentra entre los factores afectados positivamente (Tabla 14), ya que, se ha considerado muy positivamente, por ser uno de los objetivos de este proyecto, la generación eléctrica sin emisiones que afecten al cambio climático. Compensa las emisiones del transporte y teniendo en cuenta que la infraestructura principal apenas se toca desde un punto de vista de obra civil, el balance final resulta positivo. Por otro lado, los factores afectados más positivamente por un proyecto de estas características son indudablemente los socioeconómicos. La ejecución de este conllevaría la creación de numerosos tipos de trabajos, así como reducir la dependencia energética y el coste de esta. Por otro lado, este proyecto interrelaciona numerosas actividades económicas, además de posibilitar la exportación del CO₂ producido, así como el combustible excedente. Por último, promoverá el mantenimiento y la ejecución de las infraestructuras de abastecimiento energético que podrían ser empleadas en un futuro por otras formas de generación (Hidrógeno, biomasa, etc.) y mejorarían la calidad de vida.

En cuanto a las fases de la vida útil por las que pasa este proyecto, aquellas que producen impactos más negativos son: el **conjunto de fases de construcción** (-162, 40% de las fases con impacto final negativo) como la apertura de zanjas, los movimientos de tierras, obra civil y el transporte y maquinaria entre otras, debido a la obra necesaria, así como la alteración del medio. Por otro lado, destaca la **extracción del carbón** (30% de las fases con impacto negativo) como acción más impactante del proyecto, a pesar de sus beneficiosos impactos socioeconómicos, los impactos ambientales asociados a este superan con creces los impactos positivos con un valor final de -105 puntos.

En cuanto a las fases que afectan más positivamente, en primer lugar, encontramos la **restauración del suelo y reforestación** (+179) debido a sus grandes beneficios desde un punto de vista ambiental, suponiendo el 50% de los puntos asociados a acciones positivas del proyecto. La **generación de energía sin emisiones de CO₂** es otro de los aspectos con impacto más positivo (+54, 16% de las acciones positivas), ya que no sólo estamos generando energía sin afligir el medio ambiente, sino que, desde un punto de vista socioeconómico, evitamos tasas por emisiones atmosféricas. Por último, destacar la **captura**

del CO₂ y su posterior exportación o almacenamiento (+66, 19% de las acciones positivas) ya que, por un lado, dejamos de emitir emisiones de efecto invernadero y por otro, se puede obtener rendimiento económico a partir de este para ser empleado como refrigerante o tampón para soluciones de pH extremos.

El impacto final del proyecto es de -63 puntos. Al final, un proyecto de estas características siempre significa algún impacto negativo. Aunque desde el punto de vista que se le otorga en este proyecto; una medida para aumentar la sostenibilidad en la producción energética nacional mediante la generación sin emisiones, reduciendo la dependencia energética y buscando soluciones más asequibles y de esta manera, mitigar la crisis energética producto de los conflictos geopolíticos y la pandemia, compensa los grandes impactos ambientales producto del desarrollo de un proyecto de esta magnitud.

4.4.1 Valoración cualitativa

Una vez identificados los impactos más relevantes mediante la matriz de Leopold, el siguiente paso es realizar una valoración cualitativa de los impactos, tanto positivos como negativos, de los aspectos a los factores. Para ello, se tienen en cuenta más atributos de cada aspecto hacia el factor, que la magnitud e importancia que se empleaban en la matriz de Leopold. Pero antes, debemos repartir los puntos 1000 de importancia UIP. Se han repartido acorde a los promedios aritméticos obtenidos en el ejercicio anterior (Tabla 15).

Tabla 15. Reparto de UIP.

Factor	Puntuación	Porcentaje	UIP
Aire	24	12,12%	121
Clima	21	10,61%	106
Tierra	18	9,09%	91
Aguas continentales	7	3,54%	35
Vegetación y flora	5	2,53%	25
Fauna	1	0,51%	5
Intervisibilidad	14	7,07%	71
Paisaje intrínseco	1	0,51%	5
Uso recreativo	10	5,05%	51
Uso productivo	12	6,06%	61
Planeamiento urbanístico	4	2,02%	20
Dinámica poblacional	7	3,54%	35
Estructura poblacional	6	3,03%	30
Renta	24	12,12%	121
Actividades y relaciones económicas	18	9,09%	91
Infraestructura viaria	18	9,09%	91
Infraestructura no viaria	8	4,04%	40

Una vez repartidos estas unidades de importancia, comenzamos a valorar los atributos de cómo afecta cada aspecto a los factores del proyecto. Estos atributos y su forma de valoración es la siguiente (Tabla 16):

Tabla 16. Atributos de valoración cualitativa.

Atributos		
<i>Intensidad</i>	Baja	1
	Media	2
	Alta	4
	Muy alta	8
	Total	12
<i>Extensión</i>	Puntual	1
	Parcial	2
	Extensa	4
	Total	8
	Crítica	(+4)
<i>Momento</i>	Largo plazo	1
	Medio plazo	2
	Inmediato	4
	Crítico	(+4)
<i>Capacidad de recuperación</i>	Reversible	2
	Recuperable	4
	Mitigable	8
	Irrecuperable	12
<i>Persistencia</i>	Fugaz	1
	Temporal	2
	Permanente	4
<i>Efecto</i>	Indirecto	1
	Directo	4
<i>Interrelación de impactos</i>	Simple	2
	Acumulativa	4
	Sinérgica	8
<i>Periodicidad</i>	Irregular	1
	Periódica	2
	Continua	4

La valoración completa se podrá apreciar en el Anexo II. Valoración cualitativa. A continuación, mostramos los factores afectados con mayor importancia. Teniendo en cuenta que el reparto de UIP se ha efectuado basándose en los resultados de la matriz de Leopold, los resultados de la valoración cualitativa han sido semejantes a los obtenidos anteriormente. Como mencionábamos, al aire y la tierra han sido los dos factores más afectados desde un punto de vista negativo. El clima y la renta por otro lado son los factores con mayor importancia positiva (Tabla 17 y Tabla 18).

Tabla 17. Factores con mayor importancia negativa.

<i>Factores más afectados negativamente</i>	
Aire	-19,31
Tierra	-12,61
Intervisibilidad	-6,66
Uso productivo	-5,11
Infraestructura viaria	-12,82
Dinámica poblacional	-8,10

Tabla 18. Factores con mayor importancia positiva.

Factores más afectados positivamente

Clima	14,56
Renta	19,83
Actividades y rel. Económicas	9,04
Inf. No viaria	3,80

En este caso **la importancia ponderada del proyecto** es negativa, de **-29,71 puntos**. Como se valoran más atributos para cada factor en comparación con la matriz de Leopold era de esperar variaciones leves en los resultados, aunque dentro de los más y menos afectados, seguirían siendo los mismos. En este caso, la fuerza que aplica el proyecto a todos los aspectos, generación sin emisiones de efecto invernadero, reducción del coste eléctrico y reducción de la dependencia energética, además de generar grandes cantidades de empleo al volver a poner en funcionamiento las centrales obsoletas y toda la productividad que generan a su alrededor, no es capaz de compensar los impactos al medio ambiente.

4.4.2 Valoración cuantitativa

Se crea a partir de la matriz cualitativa y solo se consideran los impactos negativos. En este caso, los factores cuantitativos se pueden medir, por lo tanto, se les asignan valores de los diferentes indicadores ambientales. A cada factor se le asigna un indicador ambiental lo más representativo posible.

- Aire

Para determinar la valoración cuantitativa de este, se ha escogido el indicador Índice de Calidad del Aire, y se ha tomado el valor medio registrado en la estación Magdalena B-1, la que representa la zona de As Pontes de García Rodríguez, donde se encuentra la central térmica de carbón más grande de España. El ICA es de 39 en esta región.

- Tierra

Para determinar esta, tomaremos el porcentaje de superficie alterada por la mina a cielo abierto de Puertollano (Figura 13). En total la cuenca tiene 3600 ha, y posterior a su clausura, se han recuperado en total 935 ha. Por lo tanto, el % de superficie alterada por la actividad extractiva es de un 26%.



Figura 13. Mina a cielo abierto en la cuenca de Puertollano. Fuente: Endesa.

- Aguas continentales

Para este factor, emplearemos el Índice de pérdidas respecto de la cantidad disponible. Tomaremos de ejemplo la central de As Pontes que se abastece del río Eume casi en su desembocadura. El coeficiente de reducción global de los recursos hídricos en la Demarcación Hidrográfica en Galicia-Costa es de un 7% (Ángel Fernández Ramos, 2015).

- Vegetación

Para este factor, nos basaremos en la recuperación de la cuenca de Puertollano una vez clausurada. Las zonas recuperadas fueron humedales, olivos y frutales, vegetación autóctona y 36 hectáreas de lago que no se tendrán en cuenta. Se consideran especies vegetales de alto valor para la zona. Por lo tanto, la media de conservación es de un 75% durante la actividad extractiva.

- Paisaje intrínseco e intervisibilidad

Para evaluar el valor del indicador relacionado con este factor, nos valdremos del dato de la mina a cielo abierto de Puertollano, teniendo en cuenta el % de variación de alteración del paisaje debido a nuestra actividad. Se ha recuperado el 26% del paisaje de la cuenca de Puertollano por lo que este será el valor alterado para este indicador. Para la intervisibilidad nos valdremos del mismo valor al emplear el indicador 220, superficie de la cuenca visual libre de impacto.

- Uso recreativo y productivo

Para este factor nos valdremos del indicador 239, Aptitud para el recreo difuso y el senderismo. Nos valdremos una vez más de la superficie afectada por la mina a cielo abierto de Puertollano. Esta ocupa un 26% del área de la cuenca, por lo que en una escala del 1-4 como se da en este caso (Óptima-Buena-Regular-Mala) tendrá un valor de Regular. Para el uso productivo emplearemos el indicador 245, Aptitud para el uso forestal, ya que se ha apreciado que la cuenca ha sido reforestada.

- Infraestructura viaria

Mediante este proyecto se pretende devolver a la vida todas las instalaciones clausuradas y obsoletas. En su fase final reacondicionar el terreno es una de las fases más importantes, pero en general la infraestructura viaria es adecuada a pesar de la necesidad de rehacer algunos caminos para las actividades extractivas. Emplearemos el indicador 291, Accesibilidad de la red viaria, puntuada como adecuada.

- Dinámica poblacional

Ya que este factor se considera negativo, debido a que, en el conjunto del proyecto, la calidad ambiental se vería reducida favoreciendo la emigración, tomaremos como indicador el 269, % de población migrante en el interior de la Comunidad Autónoma, aunque tomaremos el país entero ya que es el alcance de este proyecto. El total de migración en 2021 fue de 77.117 personas.

Una vez llevados a cabo los cálculos que se pueden ver reflejados en el Anexo III. Valoración Cuantitativa, los resultados del valor global ponderado del impacto sobre el entorno es de -117,4. En la Tabla 19 se aprecian los factores más afectados cuantitativamente.

Tabla 19. Resultados valoración cuantitativa.

Valoración cuantitativa	
Factores	Vp
Aire	-43,20
Tierra	-3,32
Aguas continentales	-0,12
Vegetación	-6,74
Intervisibilidad	-3,42
Paisaje intrínseco	-40,63
Uso recreativo	-5,48
Uso productivo	0,00
Infraestructura viaria	-14,21
Dinámica poblacional	-0,26
TOTAL	-117,4

4.5 Análisis económico de la solución propuesta

Para evaluar económicamente esta alternativa de modernización de una central convencional térmica de carbón, vamos a realizar algunas hipótesis. En primer lugar, debemos definir los datos de una central modelo de las que se pretende obtener. Será una central con caldera de lecho fluido que funcionará mediante oxidación, con un tren de captura del 90% del CO₂ final. A continuación, mostraremos los datos de la propuesta a estudiar en la Tabla 20.

Tabla 20. Datos técnicos de la central modelo.

Datos técnicos de la central	
Capacidad (MW)	700
Horas de producción anuales	7300
Rendimiento térmico	37%
Vida útil (años)	30
Inicio de operación	01/01/2024
Coste de construcción (€/kWh)	-

La capacidad del grupo se establece en 700 MW, punto intermedio que recoge los grupos de las centrales más pequeñas como la de Soto Rivera de hasta 350 MW y la de Aboño con 921 MW. Para las horas de producción anual, se han tomado las horas de producción de la central de As Pontes en 2022 (El Correo Gallego, 2023). El rendimiento térmico oscila entre 44-48% en centrales ultra-supercríticas, pero le hemos restado los 9% que supone la instalación de la unidad ASU. La vida útil se establece en 30 años, teniendo en cuenta el revamping dentro del proyecto de modernización, al no ser una instalación nueva, los 40 años de vida útil de estas se ve reducido. Estableceremos el inicio de la operación a partir del 1 de enero de 2024.

4.5.1 Costes de Construcción

La información de los costes de construcción para una actualización de central convencional a central con oxidación se ha obtenido a partir de un estudio llevado a cabo por Adrián Alcalá Carrasco en 2011. Serán actualizados a 2023 mediante el Índice de Precios Industriales (IPRI). Estos se recogen en la Tabla 21 a continuación:

Tabla 21. CTC CT Lecho fluido y Captura de CO₂.

Descripción	Precio Central Convencional (M€)	Precio Central Oxidación (M€)
Ingeniería del proyecto	25	25
Equipos mecánicos (+ revamping oxidación)	675,5	968,88
Equipos eléctricos y material eléctrico	41	41
Tuberías y accesorios	19,7	19,7
Instrumentación y control	6,5	6,5
Plantas paquete	94,95	94,95
Obra civil	39	39
Montaje y puesta en marcha	56,1	56,1
Otros gastos	52,5	52,5
TOTAL CTC	1010,25	1303,18

Por lo tanto, el revamping y actualización de una central térmica convencional a una de oxidación es de 292,93 M€. En la tabla a continuación se aprecia este valor actualizado a 2023 (año de implementación) mediante los datos extraídos del INE (Tabla 22).

Tabla 22. IPRI Sector energético desde 2011-2023. Fuente: INE.

IPRI			
	Tasa anual (%)	Tasa mensual	C. Oxidación
2011	15,30	0,153	293,38 €
2012	9,70	0,097	321,84 €
2013	0,50	0,005	323,45 €
2014	-3,10	-0,031	313,42 €
2015	-8,80	-0,088	285,84 €
2016	-10,80	-0,108	254,97 €
2017	10,40	0,104	281,49 €
2018	8,00	0,080	304,00 €
2019	-1,70	-0,017	298,84 €
2020	-13,30	-0,133	259,09 €
2021	42,70	0,427	369,72 €
2022	84,80	0,848	683,25 €
2023	-26,20	-0,262	504,24 €

4.5.2 Costes de Operación y Mantenimiento (O&M)

En cuanto a los costes O&M, se diferencian en dos tipos: Costes Fijos y Costes Variables. En los CF entran los costes de la mano de obra encargada de llevar a cabo la operación de la central y el mantenimiento de esta. Los costes fijos, suelen establecerse entre un 2-3% de los CTC, mientras que los costes variables suponen un total de 3,07 €/MWh (CNE, 2020). Por lo tanto, los costes fijos serán de 12,6 M€ y los variables de 29,49 M€/año (actualizado a agosto 2023), sin tener en cuenta el coste del combustible.

4.5.3 Coste del combustible

Dentro de los carbones como combustibles, bien es sabido que existen varios tipos que se clasifican mayoritariamente por su poder calorífico. En la Figura 14 a continuación, se aprecia la clasificación ASTM de los carbones empleados como combustibles.

Clasificación ASTM de carbones			
CLASE	GRUPO	PODER CALORIFICO Kcal./kg	CARACT. AGLUTINANTES
I. ANTRACITA			No aglutinantes
II. CARBONES BITUMINOSOS	1. Bajo volátiles	-	Comúnmente aglutinantes
	2. Medio volát.	≥ 7.780	
	3. Alto volát. A	7.230 a 7.780	Aglutinantes
	4. Alto volát. B	6.400 a 7.230	
	5. Alto volát.	5.840 a 6.400	
III. CARBONES SUB- BITUMINOSOS	1. Sub-bitum. A	5.840 a 6.400	No aglutinantes
	2. Sub-bitum. B	5.280 a 5.840	
	3. Sub-bitum. C	4.500 a 5.280	
IV. LIGNITOS	1. Lignito A	3.500 a 4.600	
	2. Lignito B	< 3.500	

Figura 14. Clasificación ASTM de carbones combustibles. Fuente: ASTM.

Normalmente en la industria de generación energética a partir del carbón, se emplean carbones sub-bituminosos y ligníticos mezclados con bituminosos (hulla). La antracita, a pesar de tener mayor poder calorífico ya que tiene un 95% de carbono fijo, se emplea en pequeñas cantidades por su poca presencia en volátiles y su difícil combustión, generando llamas azules y poco potentes. En las reservas de nacionales de carbón, podemos encontrar desde Antracitas en las cuencas Asturleoneras y Córdoba, hasta hullas y carbones bajos en volátiles en estas mismas. En la cuenca de Teruel se encuentran también importantes reservas de carbón sub-bituminoso y de fácil extracción en minas a cielo abierto, así como en la cuenca de Puertollano.

Lo bueno de emplear una caldera de lecho fluidizado es la amplia variedad de combustibles que podemos emplear, ya que en el propio lecho queda retenido el azufre, uno de los limitantes en composición dentro del carbón, ya que su alto contenido debe ser eliminado antes de emitir la corriente gaseosa post-combustión al ser altamente contaminante. Y el

tiempo de residencia es mayor que en calderas de carbón pulverizado, por lo que se pueden emplear carbones de menor poder calorífico, incluso mezclas con biomasa. Además, emplear oxígeno puro como comburente mejora el rendimiento de la combustión ya que no se pierde poder calorífico en la producción de óxidos de nitrógeno.

Por eso, en este caso de estudio emplearemos carbón bituminoso que podemos encontrar en las cuencas de Asturias, León, Córdoba y Palencia (Junta de Castilla y León, s.f.). La variante de esta hulla alta en volátiles será la empleada ya que tiene una mejor combustión en caldera y tiene un poder calorífico de 7.230 a 7.780 Kcal/Kg. Emplearemos un valor medio para los cálculos, 7.505 Kcal/Kg.

Con los datos de nuestra hipótesis para el caso de estudio, la central modelo produciría anualmente:

$$700.000 \text{ kW} * 7300 \frac{\text{h}}{\text{año}} * 0,37 = 1.890.700.000 \text{ kWh/año}$$

Y para producir esa cantidad de energía con nuestro carbón, se deben emplear los siguientes kg/año.

$$7.505 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}} * 4,1868 \frac{\text{Kj}}{\text{Kcal}} * 2,8 * 10^{-4} \frac{\text{kWh}}{\text{Kj}} = 8,798 \text{ kWh/Kg}$$

$$1.890.700.000 \frac{\text{kWh}}{\text{año}} * \frac{1}{8,798 \text{ kWh}} \frac{\text{Kg}}{\text{kg}} = 214.901.113,9 \text{ Kg/año}$$

Si observamos el precio al que se encuentra el carbón en el mercado internacional (Markets Insider, 2023) (Figura 15 y Figura 16), el precio por tonelada de combustible empleado anualmente sería el siguiente:



Figura 15. Precio del carbón en el mercado internacional. Fuente: Markets Insider.



Figura 16. Gráfico evolución del precio del carbón. Fuente: Markets Insider.

Por ser el precio más actualizado, tomaremos este a inicio de operación en 2024.

4.5.4 LCOE (Coste Nivelado de la Energía)

El Levelized Cost of Energy o Coste Nivelado de la Energía en castellano, es la mejor forma de comparar diferentes formas de generación eléctrica hoy en día. Mediante este, calculamos el coste por unidad de energía producida, teniendo en cuenta diferentes parámetros económicos contabilizando todos los costes en su vida útil (CTC, O&M, inversiones, etc.) y actualizados al valor presente. Es la forma más realista de calcular el coste de un proyecto energético.

De esta manera, podemos comparar todos los sistemas de generación de energía con un solo dato, y escoger el proyecto más sostenible para cada región. Esto último es vital, ya que dependiendo en que región nos encontremos podemos observar cambios en los costes, como por ejemplo del combustible, de financiaciones o de costes de construcción. Además de tener en cuenta la energía producida en su vida útil, lo que lo hace más representativo. Por ejemplo, no es igual calcular el LCOE de un proyecto solar fotovoltaico en zonas cercanas al ecuador que, en zonas cercanas a los polos, y mediante este dato podemos obtener un dato más objetivo y optar por el mejor modelo de generación.

A continuación, se detallan los parámetros económicos de nuestra hipótesis (Tabla 23) para calcular el LCOE de la actualización y vuelta a la operatividad de las centrales térmicas de carbón en el marco nacional. Según el BCE, se espera llegar a una inflación del 2% a medio plazo, aunque en este caso tomaremos un valor más alto para tener en cuenta el plazo hasta estabilizarse, ya que en el último avance del Eurostar de julio esta se encontraba en un 5,3% (Declaración política monetaria BCE, 2023). Para el WACC tomaremos un valor del 5,58%, valor aconsejado por la CNMC en el período 2020-2025 para el transporte y distribución de

electricidad (CNMC, 2019). Para la relación deuda fondos propios, tomaremos la hipótesis de ser financiados al 60%.

Tabla 23. Parámetros LCOE central modelo.

Parámetros		
Inflación	3,5	%
WACC	5,58	%
Relación deuda / FP	60%/40%	
Tipo de interés deuda	4,5	%
Ratio de descuento	0,073	-
Vida útil	30	años

El valor de LCOE obtenido a partir de nuestros cálculos, ver Anexo IV, es de (Tabla 24):

Tabla 24. LCOE Central modelo.

LCOE OXICOMBUSTIÓN

€/kWh	0,0793
€/MWh	79,3

En la Figura 17 a continuación, se aprecian diferentes LCOE de diferentes tecnologías. El LCOE de este proyecto no ha tenido en cuenta posibles subvenciones, aunque teniendo en cuenta la mejora tecnológica y la generación sostenible que supone, se podría optar a fondos europeos. Tampoco se ha tenido en cuenta el posible rendimiento económico que podría suponer la venta del CO₂, por lo que en total este valor podría ser incluso más bajo. Aún así, el resultado es muy competitivo contra otras formas de producción a partir de combustibles fósiles, así como la Solar Térmica de Concentración. Sí es menos competitivo que la solar fotovoltaica, casi el doble, y la eólica, un 36% más caro.

Tendencias de fondo

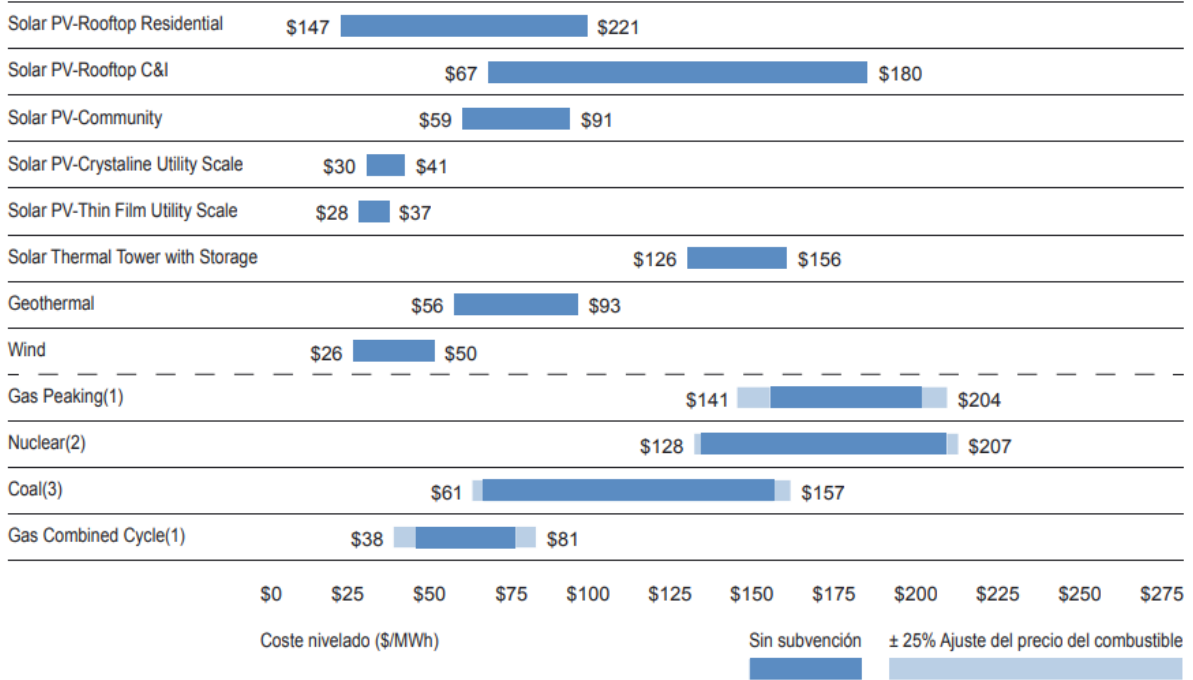


Figura 17. LCOE Generación eléctrica. Fuente: Lazard.

5. Conclusiones

Hoy nos enfrentamos a grandes crisis, tanto de carácter sanitario, que ha afectado directamente a la producción mundial y por lo tanto a nuestra economía, como geopolíticas, con la guerra entre Rusia y Ucrania, resultando en una grave crisis energética en toda Europa. Todo esto ha producido fuertes impactos en la sociedad española, como el aumento de la tasa de paro hasta valores parecidos a los de la crisis del 2009 (13,5% en 2021) y la reducción del PIB en 2021 de un -11,3%. Además, la composición del mix energético nacional, con una fuerte dependencia energética de casi el 75%, deja a la población desprotegida frente a todos estos eventos. Todo ello sin tener en cuenta la gran crisis climática que se acrecienta día a día.

Este proyecto pretende mitigar todos estos aspectos dentro del alcance nacional. Para ello, se va a reacondicionar las centrales convencionales de carbón hoy en día obsoletas. Para ello a nivel técnico será preciso llevar a cabo nuevas instalaciones además del *revamping*. Estas mejoras basadas en las MTD son principalmente: una estación separadora de aire (ASU) y poder llevar a cabo una oxidación, cambiar la caldera a una de lecho fluidizado que trabaje en régimen ultra-supercrítico, mejorando el rendimiento del ciclo, y pudiendo emplear combustibles de peor calidad, aumentando su versatilidad de cara a futuro. Y, por último, un tren de compresión y captura de CO₂ final, que nos permita la opción de no emitir gases de efecto invernadero en la producción eléctrica. Cabe mencionar que el rendimiento final se ve mermado por la ASU y el tren de compresión en un 9%, pudiendo alcanzar un rendimiento final cerca del 40%.

Desde un punto de vista ambiental, se da una escasa emisión de gases contaminantes, ya que la oxidación reduce de manera importante la producción de NO_x y el lecho fluidizado con Cal evita la existencia de SO_x en la corriente de salida de gases de combustión. Además de capturar el CO₂ producto de la combustión. Aunque los impactos ambientales que produce un proyecto de estas características son muy variados, y no sólo contemplan el clima. Debido a esto, tanto el resultado de la valoración cualitativa como de la cuantitativa son negativos desde un punto de vista ambiental, con una importancia ponderada de -29,71 y un valor global ponderado del impacto sobre el entorno de -117,4. Valores difíciles de reducir, ya que dentro de las evaluaciones ya se ha contemplado el uso de medidas correctoras y se emplean las MTD actuales.

Desde un punto de vista económico, es un proyecto competitivo frente a otros de producción energética a partir de fuentes fósiles, obteniendo un LCOE un 40% menor que las instalaciones de gas, y más teniendo en cuenta los conflictos geopolíticos y reducción de las reservas. Frente a otras formas de generación renovable como la solar fotovoltaica y la eólica es menos competitivo, hasta un 50% mayor que la eólica. Aunque estos valores pueden reducirse si tenemos en cuenta posibles subvenciones y el rendimiento económico potencial de capturar el CO₂.

Finalmente podemos decir, que es una alternativa viable y sostenible teniendo en cuenta el contexto en el que nos encontramos. Tener un mix energético variado es imprescindible para protegerse de cambios climáticos y conflictos geopolíticos, y esta se presenta como una alternativa sostenible, a corto-medio plazo, mientras estos eventos mundiales sigan presentes, y a largo plazo por el rechazo a la energía nuclear y el agotamiento de reservas de gas y petróleo.

6. Referencias y Bibliografía

- [1] Adrián Alcalá Carrasco. «Adaptación de Centrales Térmicas de Carbón al proceso de Oxidación», 2011. <https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/11748/?jsessionid=F0CED6D8B3E85FE6D940BC96CBA38E71?sequence=1>.
- [2] Alejandro Miguel Pérez. «Modelización de una central térmica supercrítica de 700 MW con captura de CO2». Consultado 14 de marzo de 2023. https://oa.upm.es/32722/1/PFC_Alejandro_Miguel_Perez.pdf.
- [3] Antonio Luis López Fuentes. «Clasificación de las tecnologías de captura de CO2». Consultado 21 de junio de 2023. <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/20214/fichero/3-Cap%C3%ADtulo+2%252FCap%C3%ADtulo+2.pdf>.
- [4] Harold Enrique Banguero Lozano. «La era del desarrollo sostenible: Nuestro futuro está en juego. Incorporaremos el desarrollo sostenible a la agenda política mundial». *Revista Lumen Gentium* 1, n.º 2 (26 de septiembre de 2017): 101-3. <https://doi.org/10.52525/lg.v1n2a9>.
- [5] «Conclusiones principales: Costos de generación de energía renovable en 2019», s. f.
- [6] Cristian Alcaraz Cobacho. «CRISIS ENERGÉTICA Y TENSIONES INTERNACIONALES», 2022.
- [7] David Vázquez Rodríguez. «Estudio de viabilidad de la adaptación de la central térmica de As Pontes para la producción con biomasa», 2019. https://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/24117/VazquezRodriguez_David_TFM_2019.pdf?sequence=2&isAllowed=y.
- [8] ENDESA Generación. «Declaración ambiental CTCC Besós». Consultado 20 de septiembre de 2023. http://www.gencat.cat/mediamb/declaracions_ambientals/ES-CAT-000410.pdf.
- [9] European Commission. «BREF Large Combustion Plants», julio de 2006. <https://prtr-es.es/Data/images//BREF%20Grandes%20Instalaciones%20de%20Combusti%C3%B3n-DDD5F411391B95FD.pdf>.
- [10] Francisco Guerrero García. «Aprovechamiento térmico de residuos estériles de carbón para generación eléctrica mediante tecnologías de combustión y gasificación eficientes y con mínimo impacto ambiental». PhD Thesis, Universidad Politécnica de Madrid, 2015. <https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.39777>.
- [11] Francisco Javier Montalvo Rubio. «Desarrollo de un modelo de análisis de la gestión del río Eume para la planificación hidrológica», s. f.

- [12] Gobierno de España. «Plan Nacional de Energía y Clima 2021-2030», 2021. https://www.miteco.gob.es/es/ministerio/planes-estrategias/plan-nacional-integrado-energia-clima/plannacionalintegradodeenergiayclima2021-2030_tcm30-546623.pdf.
- [13] Ignacio Fernández Mateo. «El sector de la minería en España: ¿Llega el fin del carbón nacional?» Universidad Pontificia de Comillas, 2015. <https://repositorio.comillas.edu/xmlui/bitstream/handle/11531/3895/TFG000648.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- [14] Irusta, R., Yolanda Núñez, y F Álvarez. *Análisis del Ciclo de Vida comparativo en una Central Térmica de carbón destinada a la generación eléctrica*, 2007. <https://doi.org/10.13140/2.1.4384.8965>.
- [15] Ismael Prieto Fernández. «Captura y almacenamiento de CO2 (Univerisdad Pública de Oviedo)», s. f.
- [16] Javier Hernández Rodríguez y Florentino Gómez Moñux. «Estudio de la aplicación de la tecnología de oxidación en calderas de lecho fluido circulante», 2017.
- [17] Javier Mellado Modrego. «Simulación central de ciclo combinado con emisiones cero y almacenamiento de energía», 2017. <https://zagan.unizar.es/record/64193/files/TAZ-TFG-2017-2865.pdf>.
- [18] L. Zheng. *Oxy-Fuel Combustion for Power Generation and Carbon Dioxide (CO2) Capture*. Elsevier, 2011.
- [19] Luis Keymer Gálvez Pacheco. «Análisis técnico y económico para el cambio de combustión en lecho fluidizado por combustión de carbón pulverizado para mejorar la operatividad del caldero TSXG de la Empresa Trupal S.A», 2020.
- [20] Macarena Vicente Enamorado. «Tecnologías avanzadas de purificación de CO2 procedente de oxidación para almacenamiento geológico», 2009.
- [21] Maria Luisa Orozco Moya. «Estado del arte de la generación de vapor mediante combustión en lecho fluido», 2016. https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/90548/fichero/TFG_MariaLuisaOrozcoMoya.pdf.
- [22] Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. «MTD Grandes instalaciones de Combustion», 2013. https://prtr.es/Data/images/MTD_Grandes_instalaciones_de_Combustion_tcm7_329024.pdf.
- [23] OMIE. «Informe integrado OMIE 2021», 2021. https://www.omie.es/sites/default/files/2022-05/informe_integrado_omie_2021_es.pdf.

- [24] Pablo Cerrada Martínez. «Diseño y análisis de una planta de separación de aire». Accedido 5 de julio de 2023. https://oa.upm.es/48874/1/TFG_PABLO_CERRADA_MARTINEZ.pdf.
- [25] REE. «El sistema eléctrico español 2011.», 2011, 148.
- [25] «Renewable Power Generation Costs in 2019», 2 de junio de 2020. <https://www.irena.org/publications/2020/Jun/Renewable-Power-Costs-in-2019>.
- [26] Ricardo David Quiroz Bazán. «Evaluación energética y económica de la central térmica de carbón ILO21», 2005.
- https://node2.123dok.com/dt02pdf/123dok_es/000/737/737058.pdf.pdf?X-Amz-Content-Sha256=UNSIGNED-PAYLOAD&X-Amz-Algorithm=AWS4-HMAC-SHA256&X-Amz-Credential=aa5vJ7sqx6H8Hq4u%2F20221114%2F%2Fs3%2Faws4_request&X-Amz-Date=20221114T181500Z&X-Amz-SignedHeaders=host&X-Amz-Expires=600&X-Amz-Signature=a2eb618a4927b16380954212e53f2548720550b810bd69142a3268ba51a07a3a.
- [27] Vidal Barrero, Fernando. «Análisis y optimización del proceso de desulfuración de gases de combustión con agua de mar», 2003. <https://idus.us.es/handle/11441/15313>.
- [28] Wheeldon, J. M., y D. Thimsen. «13 - Economic Evaluation of Circulating Fluidized Bed Combustion (CFBC) Power Generation Plants». En *Fluidized Bed Technologies for Near-Zero Emission Combustion and Gasification*, editado por Fabrizio Scala, 620-38. Woodhead Publishing Series in Energy. Woodhead Publishing, 2013. <https://doi.org/10.1533/9780857098801.2.620>.
- [29] www.ocu.org. «El precio de la luz: en 2022, facturas de récord». Accedido 30 de enero de 2023. <https://www.ocu.org/vivienda-y-energia/gas-luz/informe/precio-luz>.
- [30] Yolanda Ródenas Olaya. «Diseño de un proceso de oxidación basado en membranas cerámicas», 2014. https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/49503/TFG%20YOLANDA%20RODENAS%20LAYA%20GIQ_1404377283293463978110351905699.pdf?sequence=2.
- [31] Ana Llorente. «El G-7 ofrece miles de millones a los países emergentes para que abandonen el carbón». Accedido 18 de noviembre de 2022. <https://www.economista.es/economia/noticias/12013535/10/22/El-G7-ofrece-miles-de-millones-a-los-paises-emergentes-para-que-abandonen-el-carbon.html>.
- [32] APPA Renovables. «Producción nacional y autoabastecimiento». Accedido 19 de enero de 2023. <https://www.appa.es/la-energia-en-espana/produccion-nacional-y-autoabastecimiento/>.
- [33] Bank, European Central. «Decisiones de política monetaria», 14 de septiembre de 2023. <https://www.ecb.europa.eu/press/pr/date/2023/html/ecb.mp230914~aab39f8c21.es.html>.

- [34] BCE. «DECLARACIÓN DE POLÍTICA MONETARIA», s. f.
- [35] Beatriz Fernández Fernández. «Emma y As Pontes, restauración ambiental en zonas mineras», 2019. <https://www.linkedin.com/pulse/emma-y-pontes-restauraci%C3%B3n-ambiental-en-zonas-mineras-fern%C3%A1ndez/?originalSubdomain=es>.
- [36] Bloomberg. «Industries: Energy». Bloomberg.com, 13 de septiembre de 2023. <https://www.bloomberg.com/industries/energy>.
- [37] BOE. Desmantelamiento de la central térmica del Nárcea en el término municipal de Tineo (Asturias). Accedido 18 de noviembre de 2022. <https://www.boe.es/boe/dias/2021/01/04/pdfs/BOE-A-2021-102.pdf>.
- [38] Brundtland et. al. «Informe de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo», 1987. https://www.ecominga.ugam.ca/PDF/BIBLIOGRAPHIE/GUIDE_LECTURE_1/CMMAD-Informe-Comision-Brundtland-sobre-Medio-Ambiente-Desarrollo.pdf.
- [39] Caja de Ingenieros. «¿Qué es el LCOE y para que sirve?» https://www.caixaenginyers.com/documents/20143/663040130/gestiona_79_DOCS_2022_.pdf/8be706db-e9de-a944-0a97-f47f3e37f4fb?t=1666353990794.
- [40] CALORYFRIO, Idoia Arnabat. «Refrigeración con CO2 – ¿Cómo y por qué apostar por el CO2?», 6 de junio de 2019. <https://www.caloryfrio.com/refrigeracion-frio/refrigeracion-con-co2-como-porque-infografia.html>.
- [41] CNMC. «¿De dónde viene el gas que necesitamos en España?» CNMC Blog, 2018. <https://blog.cnmc.es/2018/08/28/de-donde-viene-el-gas-que-necesitamos-en-espana/>.
- [42] «Coal - 2023 Data - 2008-2022 Historical - 2024 Forecast - Price - Quote - Chart». <https://tradingeconomics.com/commodity/coal>.
- [43] Comisión Nacional de Energía CNE. «Informe de Costos de Tecnologías de Generación», marzo de 2020. <https://www.cne.cl/wp-content/uploads/2020/03/ICTG-Marzo-2020.pdf>.
- [44] «Decisiones de política monetaria», s. f.
- [45] «Detection and Attribution of Climate Change: from Global to Regional — IPCC». Accedido 9 de enero de 2023. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/detection-and-attribution-of-climate-change-from-global-to-regional/>.
- [46] Dr. Victor M. Ponce. «La matriz de Leopold para la evaluación de impacto ambiental». Accedido 8 de septiembre de 2023. https://ponce.sdsu.edu/la_matriz_de_leopold.html.

- [47] ELMUNDO. «El parón de la industria española por el precio de la luz afecta ya a 20.000 empleos», 18 de octubre de 2021. <https://www.elmundo.es/economia/2021/10/19/616d71b0fc6c83b8778b4583.html>.
- [48] ENDESA Generación. «Riqueza Restaurada - Hitoria de la mina de As Pontes.pdf». Accedido 18 de noviembre de 2022. <https://www.fundacionendesa.org/content/dam/fundacion-endesa-com/medio-ambiente/aspontes/riqueza-restaurada-historia-de-la-mina-de-as-pontes-III.pdf>.
- [49] «España - Emisiones de CO2 2021 | Datosmacro.com». Accedido 30 de enero de 2023. <https://datosmacro.expansion.com/energia-y-medio-ambiente/emisiones-co2/espana>.
- [50] «Frequently Asked Questions (FAQs) - U.S. Energy Information Administration (EIA)». Accedido 16 de septiembre de 2023. <https://www.eia.gov/tools/faqs/fag.php>.
- [51] Greenpeace. «El lado oscuro del carbón - ES». Greenpeace España. Accedido 18 de noviembre de 2022. <https://es.greenpeace.org/es/sala-de-prensa/informes/el-lado-oscuro-del-carbon/>.
- [52] «¿Hasta qué punto dependen los Estados miembros de las importaciones de energía?», 13 de junio de 2022. <https://www.consilium.europa.eu/es/infographics/how-dependent-are-eu-member-states-on-energy-imports/>.
- [53] IEA. «Coal - Fuels & Technologies». IEA. Accedido 18 de noviembre de 2022. <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/coal>.
- [54] INE. «Cifras de población a 1 de Enero de 2022», enero de 2022. https://www.ine.es/prensa/cp_e2022_p.pdf.
- [55] INE. «Índices nacionales y por comunidad autónoma: general y por destino económico de los bienes(27071)»
<https://www.ine.es/jaxiT3/Datos.htm?t=27071#!tabs-grafico>.
- [56] INE. «INEbase / Industria, energía y construcción /Industria y energía /Índices de precios industriales / Últimos datos». Accedido 16 de septiembre de 2023. https://www.ine.es/dyngs/INEbase/es/operacion.htm?c=Estadistica_C&cid=1254736147699&menu=ultiDatos&idp=1254735576715.
- [57] «IPRI», julio de 2023. <https://www.ine.es/daco/daco42/daco423/ipri0723.pdf>.
- [58] «International - U.S. Energy Information Administration (EIA)». Accedido 16 de septiembre de 2023. <https://www.eia.gov/international/overview/country/ESP>.
- [59] IQAir. «Índice de la calidad del aire (ICA) de As Pontes de García Rodríguez y contaminación del aire en España»

<https://www.igair.com/es/spain/galicia/as-pontes-de-garcia-rodriguez>.

- [60] Jara Miluska. «Objetivos y metas de desarrollo sostenible». *Desarrollo Sostenible* (blog). Accedido 12 de enero de 2023. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-development-goals/>.
- [61] Juan Chaves Palacios. «Desarrollo tecnológico en la Primera Revolución Industrial», 2004.
- [62] León, Junta de Castilla y León. «Tipos de carbón». Text. Junta de Castilla y León. Castilla y León. <https://energia.jcyl.es/web/es/biblioteca/tipos-carbon.html>.
- [63] Manuel Vilaseró. «España lidera el apagón mundial del carbón al cerrar plantas a un ritmo de vértigo». *elperiodico*, 22 de enero de 2020. <https://www.elperiodico.com/es/medio-ambiente/20200122/espana-lidera-el-apagon-mundial-del-carbon-al-cerrar-plantas-a-un-ritmo-de-vertigo-7811565>.
- [64] Markets Insider. «Coal PRICE Today». *markets.businessinsider.com*, 16 de septiembre de 2023. <https://markets.businessinsider.com/commodities/coal-price>.
- [65] Micronics Engineered Filtration Group, Inc. «El proceso de desulfuración de gases de combustión: Mantener la conformidad con el ELG - Micronics», 22 de mayo de 2019. <https://www.micronicsinc.com/es/filtration-news/flue-gas-desulfurization/>.
- [66] OCU. «El precio de la luz: en 2022, facturas de récord». *www.ocu.org*. Accedido 30 de enero de 2023. <https://www.ocu.org/vivienda-y-energia/gas-luz/informe/precio-luz>.
- [67] «Proceso de desulfuración, defosforación y Refinación Secundaria». Accedido 18 de abril de 2023. <http://www.tecnosulfur.com.br/es/soluciones/proceso-de-desulfuracion-defosforacion-y-refinacion-secundaria.html>.
- [68] Raymond Torres y María Jesús Fernández. «Perspectivas de la economía española tras la crisis energética». *Funcas*. Accedido 31 de enero de 2023. <https://www.funcas.es/articulos/perspectivas-de-la-economia-espanola-tras-la-crisis-energetica/>.
- [69] REE. «La demanda de energía eléctrica de España aumenta un 2,8% en junio | Red Eléctrica», 2022. <https://www.ree.es/es/sala-de-prensa/actualidad/nota-de-prensa/2022/07/la-demanda-de-energia-electrica-de-espana-aumenta-2-8-en-junio-2022>.
- [70] S.N. «Capítulo 6.1. Tecnologías de almacenamiento y captura de CO₂». Accedido 28 de junio de 2023. <http://www.fundacionenergia.es/pdfs/Carb%C3%B3n%20Futuro/Cap%C3%ADtulo%206.1.pdf>.

-
- [71] Sociedad Geológica de España. «Geología de Puertollano». https://sge.usal.es/archivos_pdf/geolodia20/guias_geolodia20/gdia20guia_ciudadreal.pdf.
- [72] Tiempo.com | Meteored. «La peor sequía en 900 años en el este del Mediterráneo», 26 de marzo de 2016. <https://www.tiempo.com/ram/241352/la-peor-sequia-en-900-anos-en-el-este-del-mediterraneo/>.
- [73] World Coal Association. «What is coal & where is it found?» World Coal Association. Accedido 18 de noviembre de 2022. <https://www.worldcoal.org/coal-facts/what-is-coal-where-is-it-found/>.
- [74] www.elcorreogallego.es. «La producción de la central de ciclo combinado de As Pontes aumenta un 50% en 2022». <https://www.elcorreogallego.es/galicia/la-produccion-de-la-central-de-ciclo-combinado-de-as-pontes-aumenta-un-50-en-2022-DG13155116>.

ANEXOS

Anexo II. Valoración cualitativa

Valoración cualitativa de impactos ambientales				
Se reparten 1000 UIP entre todos los factores ambientales				
Fórmula de la importancia: $I = + (3IN + 2EX + MO + PE + CR + EF + II + PR)$	Intensidad (IN): Alta=4; Baja=1; Media=2; Muy alta=8; Total=12	Extensión (EX): Puntual=1; Parcial=2; Extensa=4	Momento (MO): Largo plazo=1; Medio plazo=2; Inmediato=4	Capacidad de recuperación (CR): Reversible=2; Irreversible-Recuperable=4; Irreversible-Mitigable=8
	Persistencia (PE): Fugaz=1; Permanente=4	Temporal=2	Efecto (EF): Indirecto=1; Directo=4	Interrelación de impactos (II): Simple=2; Acumulativa=4
Máximo valor de la importancia (Imax)		100		Mínimo valor de la importancia (Imin)
				13

Importancia total del impacto provocado por el proyecto	-29,71
---------------------------------------------------------	--------

Subfactor	PF	Acción	Impacto	signo	Atributos positivos									Importancia			atributos de los impactos NEGATIVOS									Importancia			Acción
					IN	EX	MO	PE	CR	EF	II	PR	I-	Ist-	Ip-	IN	EX	MO	PE	CR	EF	II	PR	I'	Ist'	Ip'			
Aire	121	1.2	Movimiento de tierras y acondicionamiento del terreno	-											0,00	0,00	0,00	4	1	4	1	2	4	4	4	33,00	22,99	27,86	1.2
	121	1.3	Apertura y cierre de zanjas para canalización	-											0,00	0,00	0,00	2	4	4	1	2	4	4	4	33,00	22,99	27,86	1.3
	121	1.4	Transporte y maquinaria	-											0,00	0,00	0,00	2	1	4	1	2	4	4	4	27,00	16,09	19,51	1.6
	121	2.1	Extracción del carbón	-											0,00	0,00	0,00	12	8	8	1	4	4	8	4	81,00	78,16	94,74	1.7
	121	2.2	Transporte hasta planta del carbón	-											0,00	0,00	0,00	4	8	4	1	2	1	4	2	42,00	33,33	40,40	1.9
	121	2.7	Gestión de cenizas y otros residuos y emisiones	+	4	2	4	1	2	4	8	4			39,00	29,89	36,22									0,00	0,00	0,00	1.10
	121	3.1	Desmantelamiento de la infraestructura	-											0,00	0,00	0,00	4	4	4	1	2	1	2	4	34,00	24,14	29,26	2.1
	121	3.4	Clausura de minas	+	8	8	8	1	4	4	8	4			69,00	64,37	78,02									0,00	0,00	0,00	2.2
	121	3.5	Restaurar el suelo y reforestar el terreno	+	8	8	2	2	2	4	8	4			62,00	56,32	68,27									0,00	0,00	0,00	2.3
	121					Importancias globales: Positivas									74,62	70,83	85,85	Importancias globales: negativos									88,48	86,75	105,16

Subfactor	PF	Acción	Impacto	signo	Atributos positivos									Importancia			atributos de los impactos NEGATIVOS									Importancia			Acción
					IN	EX	MO	PE	CR	EF	II	PR	I-	Ist-	Ip-	IN	EX	MO	PE	CR	EF	II	PR	I'	Ist'	Ip'			
Clima	106	1.4	Transporte y maquinaria	-											0,00	0,00	0,00	1	2	2	1	2	4	2	1	19,00	6,90	7,31	
	106	1.5	Cimentación y hormigonado	-											0,00	0,00	0,00	2	1	1	1	2	4	2	1	19,00	6,90	7,31	
	106	1.7	Construcción canalizaciones y captura de CO2	-											0,00	0,00	0,00	1	1	1	1	2	1	2	1	13,00	0,00	0,00	
	106	1.8	Instalación de la caldera	+	4	4	2	2	2	4	2	4			36,00	26,44	28,04									0,00	0,00	0,00	
	106	2.1	Extracción del carbón	-											0,00	0,00	0,00	2	4	2	2	4	1	2	4	29,00	18,39	19,51	
	106	2.2	Transporte hasta planta del carbón	-											0,00	0,00	0,00	2	4	1	2	2	4	4	4	31,00	20,69	21,94	
	106	2.3	Puesta en marcha tras parada	-											0,00	0,00	0,00	1	1	2	2	2	1	2	1	15,00	2,30	2,44	
	106	2.5	Generación de vapor y electricidad	+	12	4	4	2	2	1	8	4			65,00	59,77	63,39									0,00	0,00	0,00	
	106	2.6	Exportación CO2	+	8	4	2	2	2	4	8	4			54,00	47,13	49,98									0,00	0,00	0,00	
	106	3.1	Desmantelamiento de la infraestructura	-											0,00	0,00	0,00	2	1	2	2	2	4	2	2	22,00	10,34	10,97	
106	3.5	Restaurar el suelo y reforestar el terreno	+	4	8	4	2	2	4	8	4			52,00	44,83	47,54									0,00	0,00	0,00		
106					Importancias globales: Positivas									74,07	70,20	74,45	Importancias globales: negativos									62,13	56,47	59,90	14,56

Subfactor	PF	Acción	Impacto	signo	Atributos positivos									Importancia			atributos de los impactos NEGATIVOS									Importancia			Acción
					IN	EX	MO	PE	CR	EF	II	PR	I-	Ist-	Ip-	IN	EX	MO	PE	CR	EF	II	PR	I'	Ist'	Ip'			
91	1.1	Delimitar el terreno adquirido mediante una valla.	-												0,00	0,00	0,00	1	1	4	2	2	4	4	1	22,00	10,34	9,40	
91	1.2	Movimiento de tierras y acondicionamiento del terreno	-												0,00	0,00	0,00	1	1	4	2	2	4	4	1	22,00	10,34	9,40	

Subfactor	PF	Acción	Impacto	signo	Atributos positivos									Importancia			atributos de los impactos NEGATIVOS									Importancia		
					IN	EX	MO	PE	CR	EF	II	PR	I-	Ist-	Ip-	IN	EX	MO	PE	CR	EF	II	PR	I'	Ist'	Ip'		
Tierra	91	1.3	Apertura y cierre de zanjas para canalización	-										0,00	0,00	0,00	4	1	4	2	2	4	4	1	31,00	20,69	18,81	
	91	1.5	Cimentación y hormigonado	-										0,00	0,00	0,00	1	1	4	2	2	4	4	1	22,00	10,34	9,40	
	91	1.7	Construcción canalizaciones y captura de CO2	-										0,00	0,00	0,00	4	2	4	2	2	4	4	1	33,00	22,99	20,90	
	91	2.1	Extracción del carbón	-										0,00	0,00	0,00	12	4	4	2	4	4	8	4	70,00	65,52	59,56	
	91	2.7	Gestión de cenizas y otros residuos y emisiones	-										0,00	0,00	0,00	12	8	4	4	8	4	8	4	84,00	81,61	74,19	
	91	3.1	Desmantelamiento de la infraestructura	-										0,00	0,00	0,00	4	4	4	4	4	4	4	4	44,00	35,63	32,39	
	91	3.2	Desmantelamiento de grandes equipos	+	4	1	4	4	2	4	4	1														33,00	22,99	20,90
	91	3.3	Retirada de materiales	+	12	4	2	4	8	4	8	4														74,00	70,11	63,74
	91	3.4	Clausura de minas	+	12	4	2	4	4	4	4	4														66,00	60,92	55,38
	91	3.5	Restaurar el suelo y reforestar el terreno	+	12	4	2	4	4	4	8	4														70,00	65,52	59,56
	91	3.6	Gestión y tratamiento de residuo	-											0,00	0,00	0,00	4	4	5	4	8	4	8	1	50,00	42,53	38,66
	91	Importancias globales: Positivas												80,74	77,86	70,78	Importancias globales: negativos									92,81	91,74	83,40

Subfactor	PF	Acción	Impacto	signo	Atributos positivos									Importancia			atributos de los impactos NEGATIVOS									Importancia		
					IN	EX	MO	PE	CR	EF	II	PR	I-	Ist-	Ip-	IN	EX	MO	PE	CR	EF	II	PR	I'	Ist'	Ip'		
Aguas continentales	35	1.3	Apertura y cierre de zanjas para canalización	-										0,00	0,00	0,00	1	1	2	2	2	4	4	4	23,00	11,49	4,06	
	35	1.5	Cimentación y hormigonado	-										0,00	0,00	0,00	2	2	2	2	2	4	4	4	28,00	17,24	6,10	
	35	2.1	Extracción del carbón	-										0,00	0,00	0,00	4	4	3	2	4	1	4	4	38,00	28,74	10,16	
	35	2.5	Generación de vapor y electricidad	-										0,00	0,00	0,00	1	1	4	2	2	4	4	4	25,00	13,79	4,88	
	35	2.7	Gestión de cenizas y otros residuos y emisiones	-										0,00	0,00	0,00	4	4	2	2	4	1	4	4	37,00	27,59	9,75	
	35	3.4	Clausura de minas	+	4	4	2	4	4	1	4	1														36,00	26,44	9,35
	35	3.5	Restaurar el suelo y reforestar el terreno	+	4	4	2	4	2	1	4	4														37,00	27,59	9,75
	35	3.6	Gestión y tratamiento de residuo	+	4	4	2	4	2	1	4	4														37,00	27,59	9,75
	35	Importancias globales: Positivas												48,42	40,71	14,39	Importancias globales: negativos									58,44	52,23	18,47

Subfactor	PF	Acción	Impacto	signo	Atributos positivos									Importancia			atributos de los impactos NEGATIVOS									Importancia		
					IN	EX	MO	PE	CR	EF	II	PR	I-	Ist-	Ip-	IN	EX	MO	PE	CR	EF	II	PR	I'	Ist'	Ip'		
Vegetación	25	1.2	Movimiento de tierras y acondicionamiento del terreno	-										0,00	0,00	0,00	1	1	4	1	2	1	2	1	16,00	3,45	0,87	
	25	1.3	Apertura y cierre de zanjas para canalización	-										0,00	0,00	0,00	4	1	4	1	2	4	4	1	30,00	19,54	4,93	
	25	1.5	Cimentación y hormigonado	-										0,00	0,00	0,00	2	1	4	1	2	4	4	1	24,00	12,64	3,19	
	25	2.1	Extracción del carbón	-										0,00	0,00	0,00	12	4	4	2	8	4	8	4	74,00	70,11	17,71	
	25	3.1	Desmantelamiento de la infraestructura	+	2	4	2	2	4	4	4	4														34,00	24,14	6,10
	25	3.3	Retirada de materiales	+	4	4	2	2	2	1	2	4														33,00	22,99	5,81
	25	3.4	Clausura de minas	+	2	1	4	1	2	1	2	1														19,00	6,90	1,74
	25	3.5	Restaurar el suelo y reforestar el terreno	+	8	4	4	1	4	4	8	1														54,00	47,13	11,90
	25	Importancias globales: Positivas												65,92	60,83	15,36	Importancias globales: negativos									80,74	77,86	19,66

Subfactor	PF	Acción	Impacto	signo	Atributos positivos									Importancia			atributos de los impactos NEGATIVOS									Importancia		
					IN	EX	MO	PE	CR	EF	II	PR	I-	Ist-	Ip-	IN	EX	MO	PE	CR	EF	II	PR	I'	Ist'	Ip'		
	5	1.1	Delimitar el terreno adquirido mediante una valla.	-										0,00	0,00	0,00	2	2	4	2	2	4	4	4	48,00	40,23	2,03	
	5	1.4	Transporte y maquinaria	-										0,00	0,00	0,00	4	2	4	2	2	4	4	4	36,00	26,44	1,34	
	5	1.6	Construcción unidad separadora de aire	-										0,00	0,00	0,00	2	4	2	2	2	1	4	4	29,00	18,39	0,93	
	5	2.1	Extracción del carbón	-										0,00	0,00	0,00	8	8	4	2	2	4	4	4	60,00	54,02	2,73	

Subfactor	PF	Acción	Impacto	signo	Atributos positivos									Importancia			atributos de los impactos NEGATIVOS									Importancia				
					IN	EX	MO	PE	CR	EF	II	PR	I-	Ist-	Ip-	IN	EX	MO	PE	CR	EF	II	PR	I'	Ist'	Ip'				
Fauna	5	2.2	Transporte hasta planta del carbón	-											0,00	0,00	0,00	2	4	2	2	2	1	4	4	29,00	18,39	0,93		
	5	2.4	Gestión unidad separadora de aire	-											0,00	0,00	0,00	1	4	2	2	2	1	2	2	22,00	10,34	0,52		
	5	3.1	Desmantelamiento de la infraestructura	+	2	1	1	1	2	1	2	1				16,00	3,45	0,17									0,00	0,00	0,00	
	5	3.2	Desmantelamiento de grandes equipos	+	2	1	4	2	2	4	2	4				26,00	14,94	0,75									0,00	0,00	0,00	
	5	3.4	Clausura de minas	+	4	4	4	2	2	1	4	1				34,00	24,14	1,22									0,00	0,00	0,00	
	5	3.5	Restaurar el suelo y reforestar el terreno	+	12	8	4	4	2	4	4	1				71,00	66,67	3,37									0,00	0,00	0,00	
					Importancias globales: Positivas									78,52	75,31	3,80	Importancias globales: negativos									75,74	72,11	3,64	0,16	

Subfactor	PF	Acción	Impacto	signo	Atributos positivos									Importancia			atributos de los impactos NEGATIVOS									Importancia				
					IN	EX	MO	PE	CR	EF	II	PR	I-	Ist-	Ip-	IN	EX	MO	PE	CR	EF	II	PR	I'	Ist'	Ip'				
Paisaje intrínseco	5	1.1	Delimitar el terreno adquirido mediante una valla.	-											0,00	0,00	0,00	2	2	4	4	2	4	8	4	36,00	26,44	1,34		
	5	1.6	Construcción unidad separadora de aire	-											0,00	0,00	0,00	4	2	4	4	2	4	8	4	42,00	33,33	1,68		
	5	2.1	Extracción del carbón	-											0,00	0,00	0,00	8	4	8	4	8	4	4	4	64,00	58,62	2,96		
	5	3.1	Desmantelamiento de la infraestructura	+	4	2	2	4	4	4	8	4				42,00	33,33	1,68									0,00	0,00	0,00	
	5	3.2	Desmantelamiento de grandes equipos	+	2	1	4	2	2	4	8	4				32,00	21,84	1,10									0,00	0,00	0,00	
	5	3.4	Clausura de minas	+	4	4	4	4	4	4	4	4				44,00	35,63	1,80									0,00	0,00	0,00	
	5	3.5	Restaurar el suelo y reforestar el terreno	+	8	4	2	4	8	4	4	4				58,00	51,72	2,61									0,00	0,00	0,00	
					Importancias globales: Positivas									68,89	64,24	3,24	Importancias globales: negativos									70,53	66,12	3,34	-0,10	

Subfactor	PF	Acción	Impacto	signo	Atributos positivos									Importancia			atributos de los impactos NEGATIVOS									Importancia				
					IN	EX	MO	PE	CR	EF	II	PR	I-	Ist-	Ip-	IN	EX	MO	PE	CR	EF	II	PR	I'	Ist'	Ip'				
Intervisibilidad	71	1.1	Delimitar el terreno adquirido mediante una valla.	-											0,00	0,00	0,00	2	2	4	4	2	4	8	4	36,00	26,44	18,69		
	71	1.6	Construcción unidad separadora de aire	-											0,00	0,00	0,00	12	4	4	4	4	4	8	4	72,00	67,82	47,95		
	71	2.1	Extracción del carbón	-											0,00	0,00	0,00	8	4	8	4	8	4	8	4	68,00	63,22	44,70		
	71	3.1	Desmantelamiento de la infraestructura	+	4	4	2	4	4	4	4	4				42,00	33,33	23,57									0,00	0,00	0,00	
	71	3.2	Desmantelamiento de grandes equipos	+	4	1	4	2	2	4	4	4				34,00	24,14	17,07									0,00	0,00	0,00	
	71	3.4	Clausura de minas	+	2	2	4	4	4	4	4	4				34,00	24,14	17,07									0,00	0,00	0,00	
	71	3.5	Restaurar el suelo y reforestar el terreno	+	8	4	2	4	8	4	4	4				58,00	51,72	36,57									0,00	0,00	0,00	
					Importancias globales: Positivas									68,89	64,24	45,42	Importancias globales: negativos									77,08	73,65	52,08	-6,66	

Subfactor	PF	Acción	Impacto	signo	Atributos positivos									Importancia			atributos de los impactos NEGATIVOS									Importancia				
					IN	EX	MO	PE	CR	EF	II	PR	I-	Ist-	Ip-	IN	EX	MO	PE	CR	EF	II	PR	I'	Ist'	Ip'				
Uso recreativo al aire libre	51	1.1	Delimitar el terreno adquirido mediante una valla.	-											0,00	0,00	0,00	2	2	4	2	2	4	4	4	30,00	19,54	9,87		
	51	1.9	Planificación del abastecimiento (agua, electricidad, carbón, etc.)	-											0,00	0,00	0,00	2	1	2	4	2	4	2	4	26,00	14,94	7,55		
	51	2.2	Transporte hasta planta del carbón	-											0,00	0,00	0,00	2	2	4	2	2	1	8	1	28,00	17,24	8,71		
	51	3.4	Clausura de minas	-											0,00	0,00	0,00	8	4	4	2	8	4	4	4	58,00	51,72	26,12		
	51	3.5	Restaurar el suelo y reforestar el terreno	+	12	4	1	4	4	4	2	4				63,00	57,47	29,03									0,00	0,00	0,00	
	51	3.6	Gestión y tratamiento de residuo	-											0,00	0,00	0,00	2	2	1	2	4	1	2	1	21,00	9,20	4,64		
					Importancias globales: Positivas									63,00	57,47	29,03	Importancias globales: negativos									71,85	67,64	34,16	-5,14	

Subfactor	PF	Acción	Impacto	signo	Atributos positivos									Importancia			atributos de los impactos NEGATIVOS									Importancia			
					IN	EX	MO	PE	CR	EF	II	PR	I-	Ist-	Ip-	IN	EX	MO	PE	CR	EF	II	PR	I'	Ist'	Ip'			

Subfactor	PF	Acción	Impacto	signo	Atributos positivos									Importancia			atributos de los impactos NEGATIVOS									Importancia			
					IN	EX	MO	PE	CR	EF	II	PR	I-	Ist-	Ip-	IN	EX	MO	PE	CR	EF	II	PR	I'	Ist'	Ip'			
Estructura poblacional	30	1.4	Transporte y maquinaria	+	2	2	4	2	4	4	4	1	29,00	18,39	5,57											0,00	0,00	0,00	
	30	1.6	Construcción unidad separadora de aire	+	2	8	2	2	2	4	4	1	37,00	27,59	8,36											0,00	0,00	0,00	
	30	1.7	Construcción canalizaciones y captura de CO2	+	2	4	2	2	4	4	4	1	31,00	20,69	6,27											0,00	0,00	0,00	
	30	1.9	Planificación del abastecimiento (agua, electricidad, carbón, etc.)	-									0,00	0,00	0,00	2	8	2	2	2	4	4	1			37,00	27,59	8,36	
	30	2.1	Extracción del carbón	+	8	4	2	1	4	4	4	4	51,00	43,68	13,24											0,00	0,00	0,00	
	30	2.2	Transporte hasta planta del carbón	+	2	4	1	2	2	4	2	2	27,00	16,09	4,88											0,00	0,00	0,00	
	30	2.4	Gestión unidad separadora de aire	+	1	1	4	2	4	4	2	4	25,00	13,79	4,18											0,00	0,00	0,00	
	30	2.8	Mantenimiento de la planta	+	1	1	4	2	2	4	2	2	21,00	9,20	2,79											0,00	0,00	0,00	
	30	3.1	Desmantelamiento de la infraestructura	-									0,00	0,00	0,00	4	2	4	4	8	4	4	4			44,00	35,63	10,80	
	30	3.2	Desmantelamiento de grandes equipos	-									0,00	0,00	0,00	4	2	4	4	4	4	4	4			40,00	31,03	9,40	
	30	3.4	Clausura de minas	-									0,00	0,00	0,00	8	4	4	4	8	4	4	4			60,00	54,02	16,37	
	30					Importancias globales: Positivas									73,11	69,09	20,94	Importancias globales: negativos									70,37	65,94	19,98

Subfactor	PF	Acción	Impacto	signo	Atributos positivos									Importancia			atributos de los impactos NEGATIVOS									Importancia			
					IN	EX	MO	PE	CR	EF	II	PR	I-	Ist-	Ip-	IN	EX	MO	PE	CR	EF	II	PR	I'	Ist'	Ip'			
Renta	121	1.4	Transporte y maquinaria	+	2	2	4	2	2	4	4	1	27,00	16,09	19,51											0,00	0,00	0,00	
	121	1.6	Construcción unidad separadora de aire	+	2	1	4	2	2	4	4	1	25,00	13,79	16,72											0,00	0,00	0,00	
	121	1.7	Construcción canalizaciones y captura de CO2	+	2	1	4	2	2	4	4	1	25,00	13,79	16,72											0,00	0,00	0,00	
	121	1.10	Pruebas de funcionamiento	+	2	1	4	2	2	4	4	1	25,00	13,79	16,72											0,00	0,00	0,00	
	121	2.1	Extracción del carbón	+	12	4	1	2	4	4	4	4	63,00	57,47	69,66											0,00	0,00	0,00	
	121	2.2	Transporte hasta planta del carbón	+	4	2	4	2	2	4	4	4	36,00	26,44	32,04											0,00	0,00	0,00	
	121	2.4	Gestión unidad separadora de aire	+	2	1	1	2	2	4	4	4	25,00	13,79	16,72											0,00	0,00	0,00	
	121	2.5	Generación de vapor y electricidad	+	4	8	2	2	8	4	8	4	56,00	49,43	59,91											0,00	0,00	0,00	
	121	2.6	Exportación CO2	+	8	2	2	2	4	1	8	2	47,00	39,08	47,37											0,00	0,00	0,00	
	121	2.8	Mantenimiento de la planta	+	1	1	2	2	2	4	2	2	19,00	6,90	8,36											0,00	0,00	0,00	
	121	3.1	Desmantelamiento de la infraestructura	-									0,00	0,00	0,00	8	4	1	4	4	4	4	4			53,00	45,98	55,73	
	121	3.2	Desmantelamiento de grandes equipos	-									0,00	0,00	0,00	4	2	1	4	4	4	4	4			37,00	27,59	33,44	
	121	3.3	Retirada de materiales	+	1	2	1	1	2	4	4	1	20,00	8,05	9,75											0,00	0,00	0,00	
	121	3.4	Clausura de minas	-									0,00	0,00	0,00	12	4	1	4	8	4	4	4			69,00	64,37	78,02	
	121	3.5	Restaurar el suelo y reforestar el terreno	+	2	4	1	4	4	4	4	2	33,00	22,99	27,86											0,00	0,00	0,00	
	121	3.6	Gestión y tratamiento de residuo	+	2	2	1	2	2	4	2	2	23,00	11,49	13,93											0,00	0,00	0,00	
121					Importancias globales: Positivas									88,86	87,19	###	Importancias globales: negativos									74,62	70,83	85,85	19,83

Subfactor	PF	Acción	Impacto	signo	Atributos positivos									Importancia			atributos de los impactos NEGATIVOS									Importancia			
					IN	EX	MO	PE	CR	EF	II	PR	I-	Ist-	Ip-	IN	EX	MO	PE	CR	EF	II	PR	I'	Ist'	Ip'			
s y relaciones ómicas	91	1.7	Construcción canalizaciones y captura de CO2	+	4	4	2	4	2	4	8	1	41,00	32,18	29,26											0,00	0,00	0,00	
	91	2.1	Extracción del carbón	+	8	4	4	2	2	4	4	4	52,00	44,83	40,75											0,00	0,00	0,00	
	91	2.2	Transporte hasta planta del carbón	+	2	2	4	2	2	1	4	4	27,00	16,09	14,63											0,00	0,00	0,00	
	91	2.6	Exportación CO2	+	12	8	4	2	2	4	8	2	74,00	70,11	63,74											0,00	0,00	0,00	
	91	2.7	Gestión de cenizas y otros residuos y emisiones	+	1	2	2	2	2	1	4	4	22,00	10,34	9,40											0,00	0,00	0,00	
	91	3.1	Desmantelamiento de la infraestructura	-									0,00	0,00	0,00	8	4	4	4	8	4	8	4			64,00	58,62	53,29	

Anexo III. Valoración cuantitativa

Valoración cuantitativa de impactos ambientales			
se reparten 1000 UiP entre todos los factores ambientales			
Fórmula de la importancia: $I = \pm(MO + PE + RV + SI + AC + EF + PR + MC)$	Momento (MO). Largo plazo=1; Medio plazo=2; Inmediato=4; (+4)	Persistencia (PE). Fugaz=1; Temporal=2; Permanente=4	Capacidad de recuperación (CR). Reversible=2; Irreversible-Recuperable=4; Irreversible-Mitigable=8; Irreversible-Irrecuperable=12
	Causa-efecto (EF). Indirecto=1 Directo=4	Interrelación de impactos (II). Simple=2; Acumulativa=4; Sinérgica=8	Periodicidad (PR). Irregular=1; Periódica=2; Continua=4
máximo valor de la importancia (Imax)	40	mínimo valor de la importancia (Imin)	8

Valor del impacto total provocado por el proyecto	-117,40
---------------------------------------------------	---------

Subfactor	PF	Acción	Impacto	Signo	Importancia			Atributos: impactos NEGATIVOS SIN						Importancia			Valoración cuantitativa SIN medidas correctoras																	
					MO	PE	CR	EF	II	PR	I-	Ist-	Ip-	MO	PE	CR	EF	II	PR	I'	Ist'	Ip'	Ind	Ind _{gn}	Ind _{con}	CA _{gn}	CA _{con}	M	T	Fc	V	Vp		
AIRE	100	1.2		-								0,00	0,00	0,00	4	1	2	4	4	4	4	19,00	34,38	34,38	1	100,000	39,000	1,000	0,568	-0,432	0,000	1,000	-0,432	-43,200
	100	1.3		-								0,00	0,00	0,00	4	1	2	4	4	4	19,00	34,38	34,38											
	100	1.4		-								0,00	0,00	0,00	4	1	2	4	4	4	19,00	34,38	34,38											
	100	2.1		-								0,00	0,00	0,00	8	1	4	4	8	4	29,00	65,63	65,63											
	100	2.2		-								0,00	0,00	0,00	4	1	2	1	4	2	14,00	18,75	18,75											
	100	2.7		+	4	1	2	4	8	4		23,00	46,88	46,88								0,00	0,00	0,00										
	100	3.1		-								0,00	0,00	0,00	4	1	2	1	2	4	14,00	18,75	18,75											
	100	3.4		+	8	1	4	4	8	4		29,00	65,63	65,63								0,00	0,00	0,00										
	100	3.5		+	2	2	2	4	8	4		22,00	43,75	43,75								0,00	0,00	0,00										
	100											30,99	71,86	71,86	Importancias globales: negativos			33,33	79,15	79,15	IN	-7,29												

Subfactor	PF	Acción	Impacto	Signo	Importancia			Atributos: impactos NEGATIVOS SIN						Importancia			Valoración cuantitativa SIN medidas correctoras																	
					MO	PE	CR	EF	II	PR	I-	Ist-	Ip-	MO	PE	CR	EF	II	PR	I'	Ist'	Ip'	Ind	Ind _{gn}	Ind _{con}	CA _{gn}	CA _{con}	M	T	Fc	V	Vp		
TIERRA	90	1.1		-								0,00	0,00	0,00	4	2	2	4	4	1	17,00	28,13	25,31	56	0,000	26,000	1,000	0,943	-0,057	0,250	0,648	-0,037	-3,323	
	90	1.2		-								0,00	0,00	0,00	4	2	2	4	4	1	17,00	28,13	25,31											
	90	1.3		-								0,00	0,00	0,00	4	2	2	4	4	1	17,00	28,13	25,31											
	90	1.5		-								0,00	0,00	0,00	4	2	2	4	4	1	17,00	28,13	25,31											
	90	1.7		-								0,00	0,00	0,00	4	2	2	4	4	1	17,00	28,13	25,31											
	90	2.1		-								0,00	0,00	0,00	4	2	4	4	8	4	26,00	56,25	50,63											
	90	2.7		-								0,00	0,00	0,00	4	4	8	4	8	4	32,00	75,00	67,50											
	90	3.1		-								0,00	0,00	0,00	4	4	4	4	4	4	24,00	50,00	45,00											
	90	3.2		+	4	4	2	4	4	1		19,00	34,38	30,94								0,00	0,00											0,00
	90	3.3		+	2	4	8	4	8	4		30,00	68,75	61,88								0,00	0,00											0,00
	90	3.4		+	2	4	4	4	4	4		22,00	43,75	39,38								0,00	0,00											0,00
	90	3.5		+	2	4	4	4	8	4		26,00	56,25	50,63								0,00	0,00											0,00
	90	3.6		-								0,00	0,00	0,00	5	4	8	4	8	1	30,00	68,75	61,88											
	90											32,59	76,85	69,16	Importancias globales: negativos			36,41	88,77	79,89	IN	-10,73												

Subfactor	PF	Acción	Impacto	Signo	Importancia			Atributos: impactos NEGATIVOS SIN						Importancia			Valoración cuantitativa SIN medidas correctoras																
					MO	PE	CR	EF	II	PR	I-	Ist-	Ip-	MO	PE	CR	EF	II	PR	I'	Ist'	Ip'	Ind	Ind _{gn}	Ind _{con}	CA _{gn}	CA _{con}	M	T	Fc	V	Vp	
AGUAS TIENEIALES	35	1.3		-								0,00	0,00	0,00	2	2	2	4	4	4	18,00	31,25	10,94	80	0,000	7,000	1,000	0,995	-0,005	0,250	0,668	-0,003	-0,117
	35	1.5		-								0,00	0,00	0,00	2	2	2	4	4	4	18,00	31,25	10,94										
	35	2.1		-								0,00	0,00	0,00	3	2	4	1	4	4	18,00	31,25	10,94										
	35	2.5		-								0,00	0,00	0,00	4	2	2	4	4	4	20,00	37,50	13,13										
	35	2.7		-								0,00	0,00	0,00	2	2	2	4	1	4	17,00	26,13	9,84										
	35	3.4		+	2	4	4	1	4	1		16,00	25,00	8,75								0,00	0,00										

Subfactor	PF	Acción	Impacto	Signo	MO	PE	CR	EF	II	PR	I-	Ist-	Ip-	MO	PE	CR	EF	II	PR	I'	Ist'	Ip'	Ind	Ind _{ep}	Ind _{op}	CA _{ep}	CA _{op}	M	T	Fc	V	Vp
Infraestructura vieja	91	1.3		-							0,00	0,00	0,00	4	2	2	4	2	1	15,00	21,88	19,91	291	3,000	2,000	1,000	0,640	-0,360	0,500	0,434	-0,156	-14,218
	91	1.4		-							0,00	0,00	0,00	4	2	4	4	2	2	18,00	31,25	28,44										
	91	1.7		-							0,00	0,00	0,00	4	2	2	4	2	1	15,00	21,88	19,91										
	91	1.9		-							0,00	0,00	0,00	2	2	2	1	2	4	13,00	15,63	14,22										
	91	2.1		-							0,00	0,00	0,00	2	2	2	4	2	1	13,00	15,63	14,22										
	91	2.2		-							0,00	0,00	0,00	4	2	2	4	2	1	15,00	21,88	19,91										
	91	2.6		+	2	2	2	4	2	1	13,00	15,63	14,22							0,00	0,00	0,00										
	91	3.1		-							0,00	0,00	0,00	4	4	2	1	4	4	19,00	34,38	31,28										
	91	3.4		+	4	4	2	4	4	4	22,00	43,75	39,81							0,00	0,00	0,00										
	91	3.5		+	4	4	8	1	4	4	25,00	53,13	48,34	4	4	8	1	4	4	25,00	53,13	48,34										
91										27,72	61,62	56,08	Importancias globales: negativos						32,55	76,72	69,82	IN	-13,74									
Dinámica poblacional	35	1.6		-							0,00	0,00	0,00	4	1	4	4	2	1	16,00	25,00	8,75	269	0,000	1,600	1,000	0,990	-0,010	0,250	0,754	-0,008	-0,264
	35	1.7		-							0,00	0,00	0,00	4	1	4	4	2	1	16,00	25,00	8,75										
	35	1.8		-										4	1	4	4	2	1													
	35	1.9		-										4	2	2	4	2	1													
	35	2.1		-										8	4	12	4	8	4													
	35	2.2		-										4	4	4	4	4	4													
	35	2.4		-							0,00	0,00	0,00	4	4	2	4	4	4	22,00	43,75	15,31										
	35	2.5		+	4	4	2	4	4	4	22,00	43,75	15,31							0,00	0,00	0,00										
	35	2.8		+	2	4	2	4	2	2	16,00	25,00	8,75							0,00	0,00	0,00										
	35	3.1		-							0,00	0,00	0,00	4	4	12	4	8	4	36,00	87,50	30,63										
	35	3.2		-							0,00	0,00	0,00	4	4	12	4	8	4	36,00	87,50	30,63										
	35	3.4		-							0,00	0,00	0,00	4	4	12	4	8	4	36,00	87,50	30,63										
	35	3.5		+	4	4	2	4	4	4	22,00	43,75	15,31							0,00	0,00	0,00										
35										26,26	53,95	18,88	Importancias globales: negativos						37,57	92,42	32,35	IN	-13,47									

Anexo IV. Levelized Cost of Energy (LCOE)

Parámetros		
Inflación	3,5	%
WACC	5,58	%
Relación deuda / FP	60%/40%	
Tipo de interés deuda	4,5	%
Ratio de descuento	0,04932	-
Vida útil	30	años
Horas de funcionamiento		
Oxcombustión	7300	h
Potencia	700	MW
Kg combustible/año	214901	t
Precio tonelada	120	€/t

LCOE	
OXICOMBUSTIÓN	
€/kWh	0,0793
€/MWh	79,3

OXICOMBUSTIÓN										
Año	Inversión inicial	Energía (kWh)	Costes fijos	Costes variables	O&M	Coste combustible	Numerador (M€)	Denominador		
0	2023	504.236.650,62 €	0,00	0,00 €	0,00 €	0,00 €	504236650,62	0,00		
1	2024	14.051.394,66 €	1.890.700.000,00	12.605.916,27 €	29.492.876,00 €	42.098.792,27 €	25.788.120,00 €	78.087.053,45 €	1801833568	
2	2025	14.051.394,66 €	1.890.700.000,00	13.047.123,33 €	30.525.126,66 €	43.572.249,99 €	26.690.704,20 €	76.574.750,29 €	1717144025	
3	2026	14.051.394,66 €	1.890.700.000,00	13.503.772,65 €	31.593.506,09 €	45.097.278,74 €	27.624.878,85 €	75.104.079,01 €	1636435048	
4	2027	14.051.394,66 €	1.890.700.000,00	13.976.404,69 €	32.699.278,81 €	46.675.683,50 €	28.591.749,61 €	73.673.484,74 €	1559519545	
5	2028	14.051.394,66 €	1.890.700.000,00	14.465.578,86 €	33.843.753,56 €	48.309.332,42 €	29.592.460,84 €	72.281.480,19 €	1486219213	
6	2029	14.051.394,66 €	1.890.700.000,00	14.971.874,12 €	35.028.284,94 €	50.000.159,06 €	30.628.196,97 €	70.926.642,56 €	1416364134	
7	2030	14.051.394,66 €	1.890.700.000,00	15.495.889,71 €	36.254.274,91 €	51.750.164,63 €	31.700.183,87 €	69.607.610,60 €	1349792374	
8	2031	14.051.394,66 €	1.890.700.000,00	16.038.245,85 €	37.523.174,53 €	53.561.420,39 €	32.809.690,30 €	68.323.081,78 €	1286349611	
9	2032	14.051.394,66 €	1.890.700.000,00	16.599.584,46 €	38.836.485,64 €	55.436.070,10 €	33.958.029,46 €	67.071.809,58 €	1225888777	
10	2033	14.051.394,66 €	1.890.700.000,00	17.180.569,91 €	40.195.762,64 €	57.376.332,55 €	35.146.560,49 €	65.852.600,98 €	1168269714	
11	2034	14.051.394,66 €	1.890.700.000,00	17.781.889,86 €	41.602.614,33 €	59.384.504,19 €	36.376.690,11 €	64.664.313,95 €	1113358856	
12	2035	14.051.394,66 €	1.890.700.000,00	18.404.256,01 €	43.058.705,83 €	61.462.961,84 €	37.649.874,26 €	63.505.855,19 €	1061028910	
13	2036	14.051.394,66 €	1.890.700.000,00	19.048.404,97 €	44.565.760,54 €	63.614.165,50 €	38.967.619,86 €	62.376.177,84 €	1011158569	
14	2037	14.051.394,66 €	1.890.700.000,00	19.715.099,14 €	46.125.562,16 €	65.840.661,30 €	40.331.486,56 €	61.274.279,42 €	963632227,7	
15	2038	14.051.394,66 €	1.890.700.000,00	20.405.127,61 €	47.739.956,83 €	68.145.084,44 €	41.743.088,59 €	60.199.199,79 €	918339713,1	
16	2039	14.051.394,66 €	1.890.700.000,00	21.119.307,08 €	49.410.855,32 €	70.530.162,40 €	43.204.096,69 €	59.150.019,20 €	875176031,2	
17	2040	14.051.394,66 €	1.890.700.000,00	21.858.482,82 €	51.140.235,26 €	72.998.718,08 €	44.716.240,07 €	58.125.856,50 €	834041123	
18	2041	14.051.394,66 €	1.890.700.000,00	22.623.529,72 €	52.930.143,49 €	75.553.673,21 €	46.281.308,48 €	57.125.867,36 €	794839632,3	
19	2042	14.051.394,66 €	1.890.700.000,00	23.415.353,26 €	54.782.698,51 €	78.198.051,78 €	47.901.154,27 €	56.149.242,62 €	757480685	
20	2043	14.051.394,66 €	1.890.700.000,00	24.234.890,63 €	56.700.092,96 €	80.934.983,59 €	49.577.694,67 €	55.195.206,68 €	721877677,9	
21	2044	14.051.394,66 €	1.890.700.000,00	25.083.111,80 €	58.684.596,22 €	83.767.708,02 €	51.312.913,99 €	54.263.015,99 €	687948078,7	
22	2045	14.051.394,66 €	1.890.700.000,00	25.961.020,71 €	60.738.557,08 €	86.699.577,80 €	53.108.865,98 €	53.351.957,61 €	655613234	
23	2046	14.051.394,66 €	1.890.700.000,00	26.869.656,44 €	62.864.406,58 €	89.734.063,02 €	54.967.676,28 €	52.461.347,83 €	624798187,4	
24	2047	14.051.394,66 €	1.890.700.000,00	27.810.094,41 €	65.064.660,81 €	92.874.755,22 €	56.891.544,95 €	51.590.530,84 €	595431505,5	
25	2048	14.051.394,66 €	1.890.700.000,00	28.783.447,72 €	67.341.923,94 €	96.125.371,66 €	58.882.749,03 €	50.738.877,51 €	567445112,5	
26	2049	14.051.394,66 €	1.890.700.000,00	29.790.868,39 €	69.698.891,28 €	99.489.759,67 €	60.943.645,24 €	49.905.784,15 €	540774132,3	
27	2050	14.051.394,66 €	1.890.700.000,00	30.833.548,78 €	72.138.352,47 €	102.971.901,25 €	63.076.672,83 €	49.090.671,40 €	515356738	
28	2051	14.051.394,66 €	1.890.700.000,00	31.912.722,99 €	74.663.194,81 €	106.575.917,80 €	65.284.356,38 €	48.292.983,12 €	491134008,7	
29	2052	14.051.394,66 €	1.890.700.000,00	33.029.668,29 €	77.276.406,63 €	110.306.074,92 €	67.569.308,85 €	47.512.185,38 €	468049792,9	
30	2053	14.051.394,66 €	1.890.700.000,00	34.185.706,68 €	79.981.080,86 €	114.166.787,54 €	69.934.234,66 €	46.747.765,46 €	446050578,4	

