



Universidad Internacional de La Rioja
Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología

Máster Universitario en Energías Renovables

Instalación para la obtención de gas de síntesis como molécula plataforma para biocombustibles para transportes turísticos

Trabajo fin de estudio presentado por:	Carolina Santamarta Ballesteros
Tipo de trabajo:	Diseño de una instalación de energía renovable (Tipo 1)
Línea/as de trabajo:	Biocombustibles
Director/a:	Rebeca Sánchez
Fecha:	Julio 2024

Resumen

El turismo impulsa la economía española, concentrando su riqueza en costas y grandes ciudades, pero también genera emisiones de gases de efecto invernadero y excluye a las zonas rurales de sus beneficios económicos. La solución a la disminución de emisiones pasa por la utilización de biocombustibles para el transporte de turistas a través de los biocombustibles de segunda generación. Se propone la fabricación de gas de síntesis mediante gasificación, a partir de biomasa lignocelulósica procedente de desecho de agricultura. Este gas será transportado a una refinería donde se refinará y se transformará tanto en biodiesel como en bioqueroseno a través del proceso de Fischer-Tropsch. La gasificación es un proceso sencillo y rentable, que permite revalorizar residuos de biomasa. Deja de ser rentable cuando hay que refinar el gas obtenido. Por ello se propone la fabricación del gas de síntesis a lo largo de la península, en instalaciones de tamaño medio, y su transporte a una refinería donde se realicen los procesos de refinado posteriores. Con este esquema de fabricación de gas de síntesis de forma atomizada y refinado en una instalación especializada se conseguirá, la redistribución de la riqueza que produce el turismo a las zonas agrícolas, al formar ellas parte de la fabricación de los biocombustibles más usados en turismo. Se ha evaluado el recurso disponible de biomasa seleccionada, paja de cereal, confirmando su idoneidad para ser utilizado para la gasificación, tanto por su poder calorífico como por su abundancia. Se ha estudiado el producto que se obtiene según los distintos parámetros del proceso, tipo de reactor de gasificación, agente gasificante, o catalizador, obteniendo un gas de síntesis que sería necesario adecuar en una etapa posterior para poder usarlo como materia prima en el proceso de Fischer-Tropsch para obtener biocombustibles.

Palabras clave: Gasificación, biomasa lignocelulósica, gas de síntesis, biodiesel, bioqueroseno, Fischer-Tropsch

Abstract

Tourism is one of the industries on the Spanish economy, concentrating its wealth on coasts and large cities, but it also generates greenhouse gas emissions and excludes rural areas from its economic benefits. The solution proposed to reducing emissions is through the use of biofuels to transport tourists with second generation biofuels. The manufacture of synthesis gas is proposed using a gasification process, feed with lignocellulosic biomass from agricultural waste. This gas would be transported to a refinery where it will be refined and transformed into both biodiesel and biokerosene through the Fischer-Tropsch process. Gasification is a simple and highly profitable process that allows biomass waste to be revalued. But it stops being profitable when the gas obtained must be refined. For this reason, the aim of this proposal is to manufacture the synthesis gas throughout the peninsula, in medium-sized facilities, and transport it to a refinery where later refining processes will be performed. With this scheme of manufacturing synthesis gas in small plants and refining it in a specialized facility, the redistribution of the wealth produced by tourism to agricultural areas would be achieved, indirectly, as they will be part of the manufacture of the most biofuels used in tourism. It has been evaluated the available resource of the selected biomass, cereal straw, confirming its suitability to be used in a gasification process, both for its calorific value and its abundance in the Spanish territory. The product obtained has been studied according to different parameters of the process, type of gasification reactor, gasifying agent and catalyst, obtaining a synthesis gas that would need to be adapted in a later stage to be able to use it as raw material in the process Fisher-Tropsh to obtain biofuels as biodiesel and biokerosene.

Keywords: Gasification, lignocellulosic biomass, synthesis gas, biodiesel, biokerosene, Fischer-Tropsh

Índice de contenidos

1.	Introducción	1
1.1.	Planteamiento del problema.....	1
1.2.	Justificación	2
1.3.	Estructura del trabajo.....	4
2.	Contexto y estado del arte	7
2.1.	Estado actual del turismo en España:	7
2.2.	Emisiones debido al transporte de turistas y posibles soluciones.....	10
2.2.1.	Transporte por carretera.....	11
2.2.2.	Transporte por Avión.....	14
2.2.3.	Conclusiones del uso de biocombustibles para transporte turístico.	17
2.3.	Proceso de gasificación	18
2.3.1.	Etapas	18
2.3.2.	Reacciones químicas.....	19
2.4.	Características de la biomasa en el proceso de gasificación.....	20
2.5.	Reactores de gasificación	21
2.5.1.	Reactores de Lecho fijo:	21
2.5.2.	Reactores de lecho fluidizado:	21
2.6.	Agentes gasificantes	22
2.7.	Catalizadores	23
3.	Objetivos del TFE.....	25
3.1.	Objetivo general	25
3.2.	Objetivos específicos	25
4.	Hipótesis de trabajo	27

5.	Requisitos de diseño	28
5.1.	Proceso de gasificación	28
5.1.1.	Biomasa	28
5.1.2.	Localización de la planta.....	28
5.1.3.	Reactores de gasificación	29
5.1.4.	Agentes Gasificantes	29
5.1.5.	Catalizadores	30
5.2.	Condiciones ideales de funcionamiento	30
5.3.	Gas de síntesis obtenido.....	31
6.	Metodología	33
6.1.	Biomasa	33
6.2.	Proceso de gasificación	33
6.3.	Procesos posteriores	34
7.	Evaluación del recurso renovable	35
7.1.	Biomasa disponible en España	35
7.2.	Tipos de residuos de biomasa	36
7.3.	Caracterización de la paja de cereal.....	40
7.3.1.	Análisis elemental.....	41
7.3.2.	Análisis de cenizas	41
7.3.3.	Poder Calorífico	42
7.4.	Pretratamiento combustible	44
8.	Diseño de la instalación.....	46
8.1.	Pretratamiento biomasa.....	46
8.2.	Proceso de gasificación	47
8.3.	Filtrado.....	47

8.4.	Compresión y almacenamiento.....	47
8.5.	Cálculo de las instalaciones	48
8.5.1.	Reactor de gasificación.....	48
8.5.2.	Composición de la biomasa:.....	50
8.5.3.	Relación agente gasificante y biomasa.....	50
8.5.4.	Temperatura y presión del proceso	51
8.5.5.	Rendimiento del gas de síntesis	51
8.5.6.	Balance de Masa.....	53
8.5.7.	Limpieza del gas de síntesis obtenido	53
8.5.8.	Eficiencia energética del proceso	55
8.5.9.	Cálculo del almacenamiento del gas de síntesis obtenido.....	55
8.5.10.	Cálculo del almacenamiento de la biomasa	56
9.	Análisis económico.....	58
9.1.	Análisis por etapas del proceso	58
9.2.	Análisis Financiero	60
9.3.	Estimación de los indicadores económicos con la instalación comercial seleccionada	61
9.3.1.	Cálculo de los indicadores Económicos.....	63
9.4.	Conclusiones de la evaluación económica	64
10.	Análisis medioambiental	65
10.1.	Impactos positivos por el uso de la biomasa y biocombustibles	65
10.1.1.	Ventajas del uso de la biomasa procedente de residuos agrícolas.....	65
10.1.2.	Evitar emisiones generadas por combustibles fósiles.....	66
10.2.	Impactos negativos de la planta de gasificación	67
10.2.1.	Construcción	67

10.2.2. Fase de Operación69

10.2.3. Fase de Desmantelamiento71

11. Resultados74

11.1. Relación de los resultados con los objetivos propuestos.....74

11.2. Ventajas del modelo propuesto75

12. Conclusiones76

12.1. Contribuciones de la propuesta77

12.2. Mejoras en el proceso de gasificación78

12.3. Procesos de refinado posteriores.....78

12.3.1. Reformado gas.....79

12.3.2. Proceso Fisher- Tropsh79

12.4. Limitaciones del estudio actual80

Índice de figuras

Figura 1: Previsión de la demanda de combustibles a 2025.	3
Figura 2 Emisiones de CO ₂ equivalente evitadas.	9
Figura 3: Evolución de las emisiones de GEI en el transporte por carretera y avión.....	10
Figura 4: Línea de trabajo de la Estrategia de Descarbonización a Largo Plazo. 2050	11
Figura 5: Evolución del uso de biocombustibles en el Transporte desde 2002 a 2020 en %. .	13
Figura 6: Combustibles alternativos a la gasolina y diésel.	14
Figura 7: Consumo por unidad de transporte en España 2019.....	15
Figura 8: Gasificador tipo downdraft. Reacciones en la gasificación por zonas	29
Figura 9: Conversión de la biomasa en biocombustibles según el tipo de biomasa.....	35
Figura 10: Tipos de cultivos en la península ibérica en 2020.	39
Figura 11: Esquema de la instalación de gasificación	46
Figura 12: Esquema de funcionamiento del gasificador	49
Figura 13: Esquema del ciclón para la eliminación de partículas en suspensión.....	54

Índice de tablas

Tabla 1: Llegadas de turistas internacionales según comunidad autónoma de destino	7
Tabla 2: Llegadas de turistas internacionales según vía de acceso.....	8
Tabla 3: Destino principal de los viajes turistas españoles (extranjero/comunidad autónoma)	8
Tabla 4: Poder calorífico de muestras de paja de cereal	42
Tabla 5: Tabla de cálculos del poder calorífico mediante fórmula Milne	43
Tabla 6: Extracto de los datos del poder calorífico de la paja de cereales	43
Tabla 7: Resultados del poder calorífico de muestras de paja.....	43
Tabla 8: Especificaciones modelo de gasificador Downdraft.....	49
Tabla 9: Composición del gas de síntesis obtenido según la biomasa seleccionada	52
Tabla 10: Composición del gas de síntesis con el modelo de gasificador seleccionado	52
Tabla 11: Impactos ambientales planta gasificación.....	72

1. Introducción

El turismo es un motor esencial para la economía española, representando el 12.8% del PIB en 2023 y se espera que aumente al 13.4% en 2024. Pero es el sector del transporte, influenciado por el turismo, quien emite una cantidad significativa de gases de efecto invernadero (GEI), contribuyendo al calentamiento global. Debido a este calentamiento, la Unión Europea busca reducir las emisiones de GEI en un 55% para 2030, y en concreto con objetivos específicos para el transporte, afectando directamente a las emisiones generadas por el turismo.

El objetivo del presente trabajo es la propuesta de una instalación para la obtención de gas de síntesis mediante proceso de gasificación, para ser posteriormente transformado en biocombustibles. Con la fabricación del gas de síntesis a partir de biomasa lignocelulósica en instalaciones de gasificación repartidos en lugares estratégicos de la península, se propone establecer una red de recogida de este. El fin es utilizar este producto como vehículo energético para la fabricación de biocombustible a través del proceso Fisher Tropsch en biorefinerías dedicadas solo a este fin. El fin es poder abastecer la necesidad del uso de los biocombustibles los transportes para turismo, en concreto en los medios de transporte terrestre y aéreo y con ello, disminuir el problema de las emisiones de gases de efecto invernadero y poder alcanzar los objetivos propuestos para 2050.

1.1. Planteamiento del problema

El turismo es crucial para el PIB de España, pero conlleva emisiones de gases de efecto invernadero durante el transporte de viajeros. Para cumplir con los objetivos medioambientales del Pacto Verde Europeo (Consejo de la UE y del Consejo Europeo, 2024), es urgente reducir estas emisiones. Este trabajo defiende el uso de biocombustibles como solución, proponiendo la instalación de plantas de gasificación para producir gas de síntesis, el cual se emplearía en la fabricación de biodiesel (para transporte terrestre) y bioqueroseno (para aviación) mediante el proceso Fisher-tropsch. Como materia prima se propone el uso de biomasa procedente de procesos relacionados con la agricultura.

1.2. Justificación

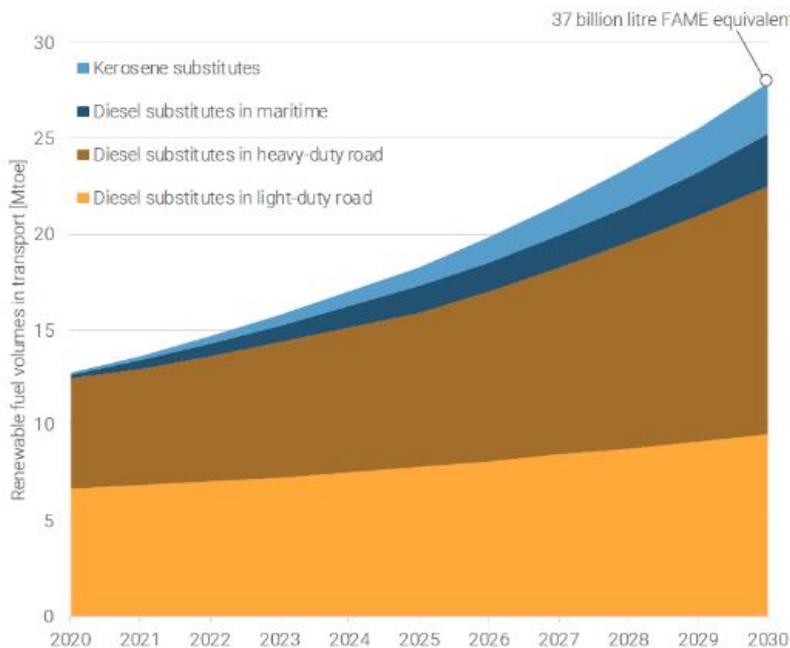
El turismo en España es uno de los motores de la economía Española, aportando el 12,8% del PIB en 2023.(*Exceltur, 2024*), siendo las previsiones para 2024 el llegar al 13,4% del PIB. La llegada de turistas internacionales a España en 2023 fue de 85,1 millones de personas, superando en 1,9% el nivel de 2019 de prepandemia (INE, 2024b). Si se añade el turismo interior, los residentes en España realizaron 185,9 millones de viajes durante el año 2023, de los cuales un 44 % fueron por ocio (INE, 2024a). Esta riqueza se queda en gran medida en los núcleos donde se genera, como lugares de costa y grandes ciudades, siendo su impacto local. Por otro lado, si se evalúa el aspecto ambiental, la UE está implementando el Pacto Verde Europeo y el paquete 'Fit 55', y busca reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en un 55% para 2030 en comparación con 1990. Esto incluye objetivos específicos para el transporte (*Consejo de la UE y del Consejo Europeo., 2024*), y con ellos impacta directamente en el turismo. En concreto se busca:

- Reducir en un 62% de emisiones para sectores sujetos al comercio de derechos de emisión (transporte aéreo) y el sector marítimo, respecto a los niveles de 2005.
- Reducir en un 42% en emisiones de la combustión de combustibles en el transporte por carretera y otros sectores adicionales, también respecto a los niveles de 2005.

En el año 2020, se emitieron a la atmósfera 100 millones de toneladas de CO₂ por parte del sector transportes (Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, 2024). De estas emisiones, el turismo aporta una parte importante, siendo los dos transportes más utilizados para el desplazamiento de turistas el terrestre (coches particulares, autobuses) y el avión.

Es imprescindible tomar medidas inmediatas en el transporte, afectando al turismo y, por ende, a la economía española, mediante el uso de biocombustibles, neutros en CO₂. Con ello se prevé un incremento del consumo de biocombustibles hasta 2050 para poder lograr la neutralidad climática (Hamelinck et al., 2021). Ya en 2030 se necesitará producir al doble de biocombustibles para cumplir 'Fit 55'. En el período 2030-2050, la mayor demanda de combustibles renovables será para el transporte por carretera de vehículos pesados, marina y aviación, siendo en 2030 previsible un 62% de la demanda de combustibles de diésel y el queroseno, como se puede comprobar en la figura 1.

Figura 1: Previsión de la demanda de combustibles a 2025.



Fuente (Hamelinck et al., 2021)

Pero las ventajas del uso del biocombustibles también influyen en otros aspectos como: (Hamelinck et al., 2021)

- Independencia de la UE en materia de combustibles con respecto a los combustibles fósiles.
- Mejora en la economía circular al reutilizar desechos, en este caso procedentes de la agricultura.
- Impulso en el desarrollo de la economía rural.

La producción de biocombustibles a partir de cultivos alimentarios genera controversia debido a la competencia con la producción de alimentos (Paul Baker, et al., 2017). Se necesita desarrollar tecnologías de producción de biocombustibles de segunda y tercera generación que utilicen materiales no alimentarios. Los biocombustibles avanzados, según el estudio de la UE de biocombustibles avanzados (Paul Baker, et al., 2017), deben cumplir:

- Se producen a partir de materias primas lignocelulósicas (residuos agrícolas y forestales), cultivos no alimentarios (pastos, miscanthus, algas) o flujos de desechos y residuos industriales.
- Producen bajas emisiones de CO₂ o altas reducciones de GEI.

- Impacto uso de las tierras destinadas a la producción de alimentos nulo o bajo.

Para el año 2050, se estima que los biocombustibles avanzados podrían satisfacer casi la mitad de las necesidades energéticas del sector del transporte en la Unión Europea, utilizando principalmente materias primas locales. Como procesos de transformación, la **gasificación y la pirólisis** se perfilan como las tecnologías más prometedora (Paul Baker, et al., 2017).

Se espera una fuerte electrificación de los transportes individuales por carretera, reduciendo el uso de combustibles fósiles del 80% en 2030 al 40% en 2050. La biomasa y la electricidad ganarán importancia, cubriendo entre el 8% y el 22%, y entre el 30% y el 48% respectivamente (Paul Baker, et al., 2017). En contraste, el transporte en autobús y avión se inclina hacia el uso de biocombustibles, especialmente debido a los altos costos de los vehículos.

Debido a lo anteriormente expuesto, la propuesta es la fabricación de gas de síntesis a partir del proceso de gasificación, obteniendo gas de síntesis que se transformará en biocombustibles de segunda generación, siendo éstos la alternativa al uso de combustibles fósiles en el transporte.

1.3. Estructura del trabajo

Para la justificación del presente trabajo, se va a analizar de la situación del turismo en España, revisando los datos económicos en los que impacta y las emisiones derivadas del transporte de turista. El análisis se va a centrar en los dos medios mayoritarios de transporte, terrestre y aéreo. Se propondrá el uso de biocombustibles como elemento fundamental para lograr la neutralidad climática en 2050 y se analizará brevemente su uso actual y las posibles alternativas. Una vez analizado el problema, se propondrá la obtención de gas de síntesis a través de la gasificación de biomasa lignocelulósica como materia prima para la obtención de biodiesel y bioqueroseno.

Se va a explicar el proceso de gasificación y cada una de sus etapas, las características que debe de cumplir la biomasa a utilizar, los tipos de reactores según el proceso elegido y los agentes gasificantes y catalizadores que pueden ser utilizados según el proceso elegido.

Con estas bases, se detallarán los objetivos que se pretenden obtener y se van a realizar las hipótesis de trabajo que se van a ir verificando si se cumplen o no en cada uno de los posteriores apartados.

Se van a detallar los requisitos de diseño de la planta de gasificación, enumerando los que debe cumplir la biomasa, así como donde localizar la planta de gasificación según la disponibilidad de la materia prima. Con ello se va a proponer el tipo de reactor a utilizar, el agente gasificante idóneo para la obtención del gas de síntesis apto para la obtención posterior de biocombustibles y que catalizadores mejorarían el proceso. Se propondrán unas condiciones ideales del proceso y se estimará el gas de síntesis que se va a obtener con estas condiciones.

Se explicará la metodología que se va a utilizar en el cálculo de las instalaciones.

Se va a evaluar la biomasa disponible en el territorio peninsular español, seleccionando el tipo más abundante que tiene una distribución homogénea a lo largo de toda España. Se va a explicar la estructura de la biomasa lignocelulósica seleccionada y se va a caracterizar según su análisis elemental, la humedad y porcentaje en cenizas. Con estos datos se estimará el poder calorífico del que se dispone para el proceso de gasificación.

Tras el estudio anterior se pasa al diseño de las instalaciones de la planta de gasificación, detallando cada una de las fases del proceso, desde el pretratamiento y almacenaje de la biomasa hasta el almacenaje y transporte del gas de síntesis obtenido. Para poder estimar si la propuesta es viable, se elegirá un gasificador comercial y se calculará la cantidad de biomasa necesaria, gas de síntesis obtenido, así como el rendimiento de la instalación.

Con el cálculo de la instalación comercial, se hará un análisis económico para verificar la viabilidad del proyecto usando indicadores económicos. Así mismo, se hará un análisis ambiental de todo el proceso, desde el uso de biomasa y biocombustibles al impacto de una instalación de gasificación, para poder obtener los impactos positivos y negativos de todo el proceso.

Finalmente se analizará si se han obtenido los objetivos planteados al inicio, y se presentarán las posibles mejoras al proceso de gasificación propuesto, así como los posteriores procesos a realizar sobre el gas de síntesis para la obtención de biodiesel y bioqueroseno. En las conclusiones se va a evaluar si la propuesta es viable y realista y se va a destacar la posible

Instalación para la obtención de gas de síntesis como molécula plataforma para biocombustibles para transportes turísticos

contribución a la redistribución de la riqueza económica que proviene del turismo y la reducción de las emisiones de efecto invernadero que se obtendrían con el uso de biocombustibles.

2. Contexto y estado del arte

Mediante el análisis del estado actual del turismo en España, se verá como éste contribuye tanto a la riqueza económica como afecta directamente a las emisiones de gases de efecto invernadero durante el transporte de viajeros.

2.1. Estado actual del turismo en España:

Durante el año 2023 España recibió 85 millones de turistas internacionales, un 18,7% superior al año 2022, con valores similares a los obtenidos en 2019, antes de la pandemia de COVID-19. Este año, 2019, fue tomado como año récord en la llegada de turistas, por lo que el dato obtenido en 2023 es excepcional. El gasto total por turista extranjero en 2023 ascendió a 108.662 millones de euros, según el ministerio de Industria y Turismo, en su comunicado realizado durante la celebración de FITUR 2024 (MINECOTUR, 2024). Los principales países de origen de los turistas que visitaron España durante el año 2023 fueron Reino Unido, Francia y Alemania. En la tabla 1 se comprueba el crecimiento cercano al 20% en la llegada de visitantes del resto de Europa, siendo Estados Unidos quien crece con más fuerza en el número de turistas internacionales fuera de la UE, con un 38,7% más que el año anterior.

Tabla 1: Llegadas de turistas internacionales según comunidad autónoma de destino

	Valor absoluto	Variación anual (%)
TOTAL	85.056.528	18,70
Andalucía	12.200.666	21,89
Illes Balears	14.405.322	9,10
Canarias	13.942.965	13,10
Cataluña	18.004.010	21,22
Comunitat Valenciana	10.491.985	21,77
Madrid, Comunidad de	7.841.055	29,64
Resto CC. AA.	8.170.526	23,78

Fuente: INE, 2024

Estos turistas extranjeros utilizan mayoritariamente el avión como medio de transporte para su llegada a España como refleja la tabla 2, pudiendo además complementar su viaje con desplazamientos por medios terrestres durante su estancia, tanto autobuses como coches de alquiler.

Tabla 2: Llegadas de turistas internacionales según vía de acceso.

	Valor absoluto	Variación anual (%)
TOTAL	85.056.528	18,70
Aeropuerto	69.502.712	17,19
Carreteras	13.397.164	22,19
Puertos	1.815.596	57,57
Ferrocarril	341.056	45,05

Fuente: INE, 2024

Además de los datos internacionales de turistas en 2023, se añade el turismo nacional. Los residentes en España realizaron 185,9 millones de viajes, lo que supuso aumentando 8,5% respecto al año 2022 (INE, 2024a).

En cuanto a los lugares a los que se desplazaron los turistas españoles, el 89,6% de los viajes tuvo como destino principal España y el 10,4% el extranjero. Y en cuanto a las comunidades autónomas que más se visitaron, en la tabla 3 se puede comprobar que destacan Andalucía y Cataluña, mismos destinos elegidos por los turistas internacionales, al igual que la comunidad Valenciana (INE, 2024b).

Tabla 3: Destino principal de los viajes turistas españoles (extranjero/comunidad autónoma)

	Valor absoluto	Distribución porcentual
2023		
Total	185.895.163	100,0
Extranjero	19.290.525	10,4
Andalucía	31.796.819	17,1
Cataluña	23.763.022	12,8
Comunitat Valenciana	18.477.734	9,9
Castilla y León	16.401.602	8,8
Madrid, Comunidad de	11.945.287	6,4

Fuente: INE, 2024

Como se puede ver en las tablas de los lugares visitados tanto por turistas extranjeros como turistas nacionales, se engloba casi la totalidad del territorio español, pero se quedan fuera de estos buenos datos comunidades del interior de España, a excepción de grandes ciudades.

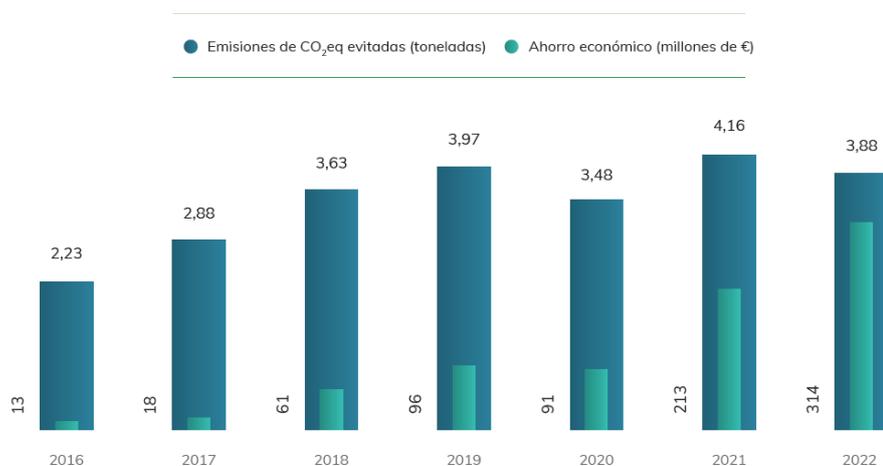
El turismo es la industria que aporta el 11,6% del PIB en 2022 a la economía española, con 155.946 millones de euros y generando el 9,3% de los empleos directos del total (INE, 2023).

Las previsiones para 2024, llegada de turistas internacionales aumentará un 3,8% en 2024, creciendo los británicos y estadounidenses por encima de la media. (*CaixaBank research*, 2024). El estudio ha contemplado los riesgos geopolíticos internacionales y concluido que la

seguridad percibida, la cual es una de las claves del éxito del turismo español, con una puntuación de 6/7 en el índice de competitividad turística del World Economic Forum. Esto se debe a la estabilidad política, baja tasa de criminalidad, infraestructura de seguridad sólida, medidas de seguridad implementadas y la actitud acogedora de la población local. En comparación con otros destinos turísticos, esta percepción de seguridad diferencia a España y atrae más visitantes, contribuyendo al éxito de su industria turística. Pero esta seguridad y ventajas económicas de un destino turístico deben de compaginarse con un destino sostenible y alineado con los objetivos de Europa en su fit '55' (*Consejo de la UE y del Consejo Europeo.*, 2024). Se estima que, en 2020, el sector del transporte emitió 100 millones de toneladas de CO₂, con una parte importante atribuible al turismo. Ante el objetivo de neutralidad climática para 2050, es crucial adoptar medidas en el transporte, lo que afectará al turismo y a la economía española.

Pero aún con esta necesidad de combustibles renovables, el impacto en el PIB nacional de la producción de biodiesel, en lugar de aumentar, ha ido disminuyendo de forma paulatina hasta 2022, debido a la entrada masiva de combustibles fósiles a bajo precio y la importación de biocombustibles de otros países. (APPA & Deloitte, 2022). Aun así, el crecimiento en puesto de trabajo relacionados con la producción de bioetanol y biodiesel aumentó en los últimos años de forma constante. Igualmente, debido al uso de biocombustibles en el transporte en, se evitó la emisión de 3,88 toneladas equivalentes de CO₂ a la atmósfera, como se puede ver en la figura 2:

Figura 2 Emisiones de CO₂ equivalente evitadas.



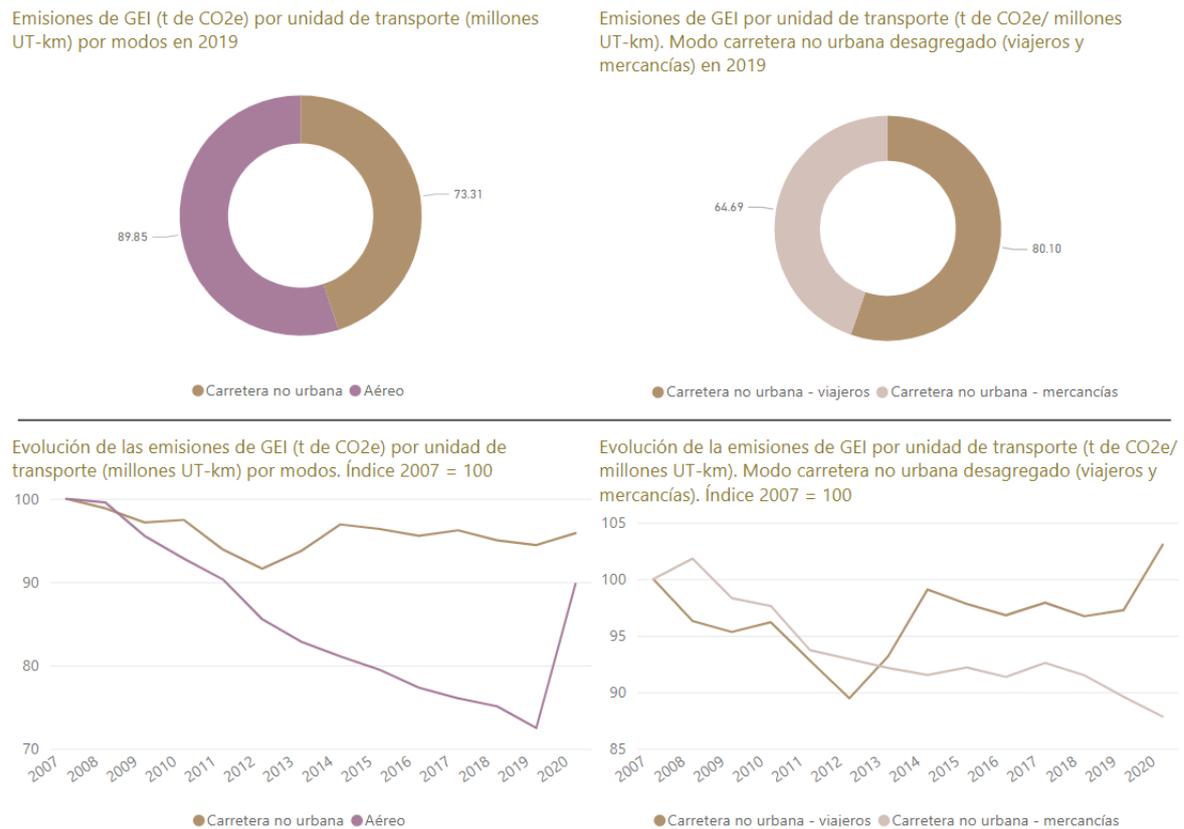
Fuente: Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, APPA Renovables y Deloitte

La alternativa es el uso de biocombustibles neutros en CO₂, destacando el gas de síntesis como un producto clave para su producción. Por ello, se van a analizar los datos actuales de emisiones en el transporte, haciendo hincapié en el transporte por carretera de vehículos pesados y en aviación. Se deja fuera de este análisis los turistas llegados por barco, ya que el repostaje no siempre se realiza en los puertos españoles.

2.2. Emisiones debido al transporte de turistas y posibles soluciones

La evolución de las emisiones de gases de efecto invernadero ha ido descendiendo desde 2007 en España, situándose en 2019 en un +8,2 % respecto a 1990, como refleja la figura 3. La participación del transporte en estas emisiones es alta, siendo del 36,8% con respecto del total en 2020. (Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, 2023).

Figura 3: Evolución de las emisiones de GEI en el transporte por carretera y avión.

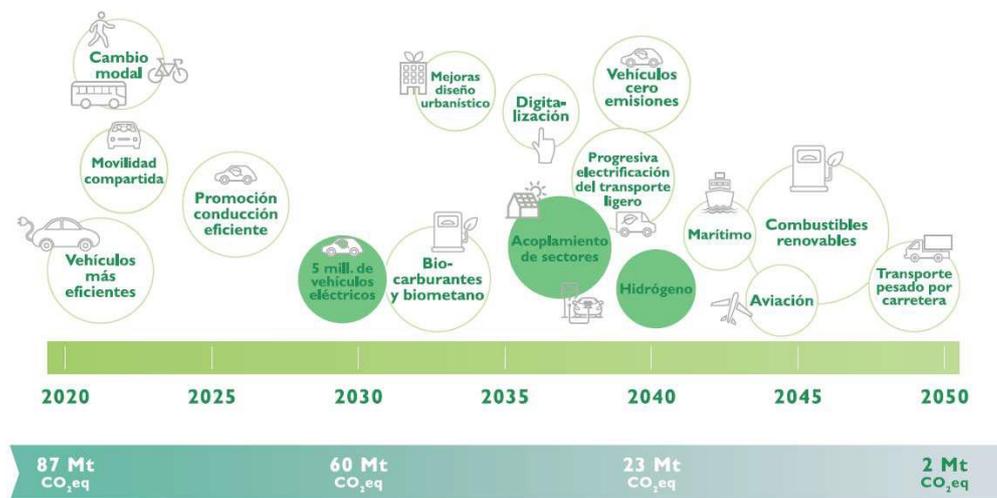


Fuente: OTLE, 2024

Dentro de la estrategia española para la descarbonización en el transporte, están presente a corto y medio plazo el uso de biocombustibles y combustibles renovables. Esto viene reflejado

en la figura 4, la cual ha sido extraída del portal del observatorio del transporte y la logística de España.

Figura 4: Línea de trabajo de la Estrategia de Descarbonización a Largo Plazo. 2050



Fuente: OTLE, 2024

2.2.1. Transporte por carretera

Se va a analizar el estado actual de las flotas de autobuses para el transporte de viajeros, así como la influencia de estas en las emisiones de gases de efecto invernadero. Adicionalmente se evalúa el uso actual y futuro de los biocombustibles en este medio de transporte, así como las alternativas a los mismos.

2.2.1.1. Flota actual de autobuses en España

En 2019, España contaba con 3350 empresas de transporte por autobús, con una media de 13 autobuses por empresa, hasta un total de 144000 autobuses. La ocupación media por vehículo es de 23 pasajeros con una contaminación 5,5 veces menor que un vehículo privado. (CONFEBUS, 2019). Aún con estos datos, el sector turístico de transporte por autobús se encuentra en una encrucijada, ya que tiene que cumplir los objetivos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero propuestos por la Unión Europea, en concreto con la reducción de hasta el 65% de CO₂ con respecto al nivel de 1990 (Paul Baker, et al., 2017). Además, el transporte por carretera es el responsable de la elevada dependencia energética de España, cercana al 70% (Ministerio de Industria, Energía y Turismo, 2015).

2.2.1.2. Emisiones debidas al transporte por carretera

El transporte por carretera es el principal emisor de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera dentro de los transportes. En España, en promedio, durante el periodo 1990-2020, representó el 91,2% del total de las emisiones de GEI del sector transporte, aumentando a un 92,7% en 2019. Esta proporción es ligeramente inferior a la media europea (96,2%). Las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) del transporte de viajeros por carretera ascendieron a 24,432 kilotoneladas de CO₂ equivalente en 2020 y 30,480 kilotoneladas de CO₂ equivalente en 2019, representando un 58,5% y un 61,1% respectivamente del total de emisiones del transporte por carretera. Este porcentaje no ha sido constante y ha ido evolucionando desde el 52,7% en 1990, alcanzando su máximo en 2013 con un 64,4%.(Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, 2023).

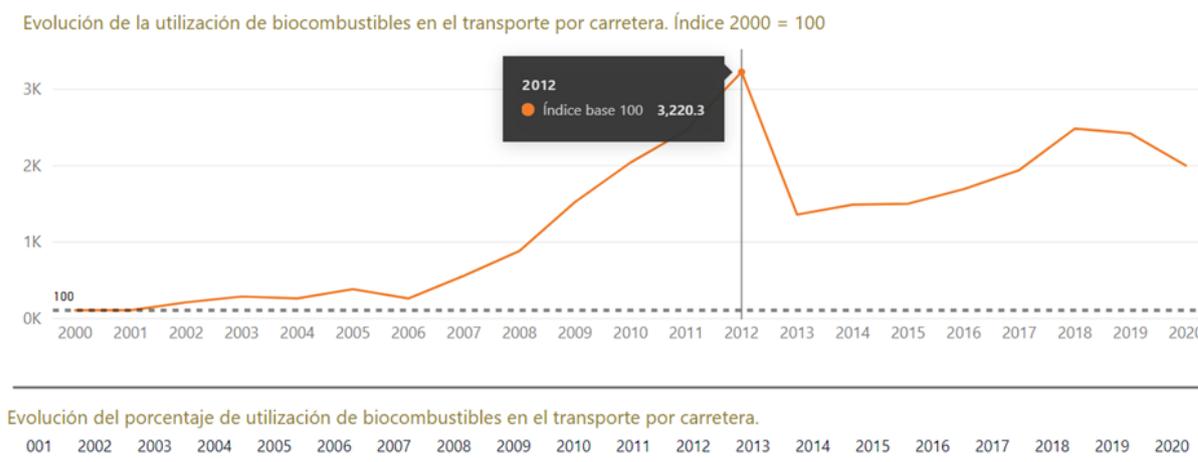
En cuanto a las previsiones, se prevé que la reducción de emisiones de GEI para el transporte sea de un 34% en 2030 con respecto a 2021, con la aplicación de medidas para ello, entre las que incluyen el uso de biocombustibles (Ministerio para la transición ecológica y reto demográfico, 2023a).

2.2.1.3. Biocombustibles en transporte terrestre

El panorama actual de emisiones ha mejorado con respecto a los primeros años de este siglo, sobre todo por las mejoras en la eficiencia de los motores de los vehículos y en debido a la forma de conducción eficiente de los conductores y en la instalación de catalizadores.

En cuanto uso de biocombustibles en el transporte, se puede obtener la evolución durante el periodo de 2000 a 2020 del observatorio para el transporte (Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, 2024), siendo el máximo consumo en 2012, como se observa en la figura 5.

Figura 5: Evolución del uso de biocombustibles en el Transporte desde 2002 a 2020 en %.



Fuente: OTLE, 2024

La introducción de los biocombustibles fue en la primera década del siglo XXI, con una fuerte crecida hasta el año 2012, donde experimentó su máximo. A partir de ese momento el % mezclado con combustibles fósiles empezó a decaer hasta el 5% debido a la fuerte competencia en precio (APPA & Deloitte, 2022).

Debido a la necesidad de reducción de GEI impuestas por Europa y por el cambio climático, se va a recurrir al uso a medio plazo de los biocombustibles. En el transporte de viajeros por carretera, el biocombustible más utilizado es el biodiésel (Paul Baker, et al., 2017). El biodiésel tiene la capacidad de reducir las emisiones de partículas y monóxido de carbono (CO) hasta en un 50%, y las emisiones de hidrocarburos no quemados hasta en un 70%, dependiendo de la proporción de biodiésel presente en la mezcla (APPA & Deloitte, 2022).

2.2.1.4. Futuro biocombustibles en transporte terrestre.

La previsión de uso de biodiésel en transporte pesado, en un futuro a medio plazo, es la sustitución del 80-90% de los combustibles fósiles, para poder lograr los objetivos de emisiones de CO₂ (Paul Baker, et al., 2017). La mejor forma de reducir estas emisiones es aumentando la proporción de biocarburantes, que son de origen renovable y pueden disminuir la huella de carbono del combustible (Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, 2023).

2.2.1.5. Otras alternativas renovables para el transporte terrestre

Según el informe de la estrategia del impulso del vehículo con energías alternativas para el año 2020, la energía disponible para todas las distancias para el transporte terrestre es el uso de biocombustibles líquidos. Además, para su uso no son necesarias ni nuevas infraestructuras de repostaje (sirven las actuales gasolineras), ni se ve afectado la distribución ni la modificación los vehículos. Se puede ver la comparativa de los distintos candidatos para sustituir a los combustibles fósiles en la figura 6 en el transporte de viajeros por carretera, según la distancia a recorrer. Por un lado, no es posible la introducción de la electrificación a gran escala, por el tamaño de las baterías necesarias. Las otras opciones contempladas (GLP y Gas Natural) provienen de fuentes fósiles. En cuanto al hidrógeno verde, que podría ser utilizado en largas distancias, actualmente no hay ni infraestructura ni opciones comerciales de vehículos para el transporte por carretera. (Ministerio de Industria, Energía y Turismo, 2015).

Figura 6: Combustibles alternativos a la gasolina y diésel.

COMBUSTIBLE	MODO	VIAJEROS POR CARRETERA		
	ALCANCE	Corta Distancia	Media distancia	Larga distancia
GLP				
GAS NATURAL	GNL			
	GNC			
ELECTRICIDAD				
BIOCOMBUSTIBLE (líquidos)				
HIDROGENO				

Fuente: Ministerio de Industria, Turismo y Energía (2015)

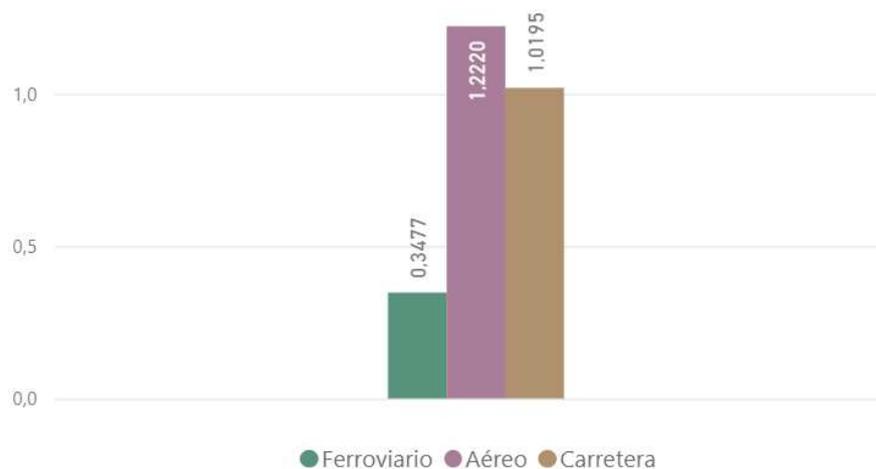
2.2.2. Transporte por Avión

Se va a evaluar el consumo de combustibles que requiere el transporte de turistas y las emisiones derivadas de este consumo. Se analiza el uso presente y futuro de biocombustibles en este tipo de transporte, así como las posibles alternativas.

2.2.2.1. Consumo combustible por unidad de transporte en aviación

En el caso de aviación, es importante tener en cuenta el dato de consumo de energía por unidad de transporte. Este dato es más representativo que el consumo total, ya que, al contrario del transporte terrestre en el que solo intervienen los vehículos censados en España, en el transporte aéreo el problema de emisiones es más global. Como dato, el transporte aéreo doméstico en España representó el 2,0 % del consumo total de energía en 2020, según los datos del Sistema Español de Inventario de Emisiones. Además, este tipo de transporte se basa principalmente en el uso de queroseno o jet fuel, con un uso mínimo de gasolina de aviación o biocarburantes. Pero si se tiene en cuenta en el consumo de energía por unidad de transporte, aviación es el método de transporte con mayor impacto como se puede ver en la figura 7. (Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, 2023).

Figura 7: Consumo por unidad de transporte en España 2019.



Fuente: OTLE, 2024

A pesar de ser el transporte con más consumo por unidad de transporte, desde 2005 ha venido mejorando sensiblemente el consumo de combustible, debido a mejoras en la eficiencia energética de los motores de los aviones, disminuyendo el consumo en un -33,4%. (Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, 2023).

2.2.2.2. Emisiones de gases de efecto invernadero en aviación

El turismo de los residentes en España a otros países e internacional hacia España es el responsable de la mayoría de los movimientos de aeronaves sobre el cielo español. En julio de 2023 se gestionó el mayor número de vuelos en España, con una cifra 6,8% superior a la media

Europea. En 2023, el transporte aéreo en España experimentó aumentos significativos: los vuelos internacionales aumentaron un 10,6 %, los vuelos nacionales crecieron un 8,9 % y los sobrevuelos, que no tienen origen ni destino en aeropuertos españoles, aumentaron un 21,9% (Ministerio de la Presidencia, 2023). En 2019, año récord en turismo en España, el sector de la aviación mundial produjo aproximadamente 915 millones de toneladas de CO₂. Esto representó alrededor del 2,1 % del total de las emisiones anuales emitidas a nivel global. (National geographic, 2022).

Para abordar este tema de forma global, se ha desarrollado el plan CORSIA por la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI), Esquema de Compensación y Reducción de Carbono para la Aviación Internacional, en el cual se compensa las emisiones a partir de 2020 mediante la adquisición de créditos de carbono para proyectos de absorción de carbono o tecnologías renovables. La Directiva (UE) 2023/958 busca llegar al objetivo de reducción del 55% en emisiones para 2030 del Pacto Verde Europeo y reducir el Régimen de Comercio de Derechos de Emisión de la UE para la aviación al CORSIA. Esto eliminaría la asignación gratuita de derechos de emisión a los operadores aéreos, con reducciones anuales del 4,2% en 2023 y descuentos adicionales del 25% en 2024 y 50% en 2025. (Ministerio para la transición ecológica y reto demográfico, 2023b).

2.2.2.3. Biocombustibles en transporte aéreo.

La forma de lograr la reducción en las emisiones de GEI es mediante el uso de SAF (Combustibles aéreos sostenibles). Son combustibles de hidrocarburos procedentes de fuentes renovables que emiten dióxido de carbono cuando se queman en el motor de la aeronave. El grado de reducción de emisiones que proporciona un SAF en particular depende del perfil de emisiones del ciclo de vida, teniendo en cuenta la producción, el transporte y la combustión del SAF, así como los efectos indirectos asociados con estos. Se requiere que los combustibles SAF reduzcan las emisiones en al menos un 50 por ciento en términos de ciclo de vida en comparación con el combustible para aviones. Los Combustibles de Aviación Sostenible (SAFs) aprobados por ASTM International (ASTM) D7566 para su uso en mezclas de hasta un 10% a un 50%. Los SAF se producen a partir de gas de síntesis, grasas, aceites y grasas; azúcares; y alcoholes. (US department of energy, 2020).

2.2.2.4. Futuro biocombustibles en transporte Aéreo.

En la hoja de ruta para la descarbonización de transporte, se proponen medidas tecnológicas, especialmente en aeronaves y combustibles sostenibles de aviación (SAF), junto con mejoras en la gestión del tráfico aéreo para mejorar la eficiencia de cada trayecto (Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, 2023). La única opción viable a corto plazo y medio plazo para la propulsión de aeronaves es el uso de combustibles "drop-in", que no requieren adaptación a las aeronaves o infraestructuras. Los combustibles "drop-in" más sostenibles son aquellos generados a partir de recursos renovables como la biomasa. (Paul Baker, et al., 2017).

2.2.2.5. Otras alternativas renovables para el transporte aéreo

La mayoría de las emisiones por el transporte aéreo provinieron de vuelos de más de 1.500 kilómetros, sin alternativas de transporte viables. La ocupación media de los aviones a nivel mundial es del 83%, superando otros medios de transporte. La modernización de la flota y el desarrollo de combustibles sostenibles han mejorado la eficiencia, con aviones modernos consumiendo menos de 3 litros de combustible por cada 100 pasajeros y kilómetro, comparables con la eficiencia de la mayoría de los coches modernos (National geografic, 2022).

En el caso de los aviones, cuya vida media es de 25 años, es todavía más difícil introducir variaciones en la forma de propulsión, en comparación con el caso del transporte terrestre. La posibilidad de electrificación de los aviones es casi nula, y cualquier desarrollo de motores lleva asociado el rediseño de los aparatos completos, con perspectivas más allá del 2050 (Paul Baker, et al., 2017). Por lo que la única alternativa viable a corto y medio plazo es el uso bio-queroseno.

2.2.3. Conclusiones del uso de biocombustibles para transporte turístico.

Derivado de la necesidad de conjugar economía y medio ambiente, para lograr la transición ecológica y sostenible de los vehículos dedicados al transporte turístico terrestre y aéreo, es imprescindible a corto y medio plazo el uso de biocombustibles.

La electrificación de vehículos pesados de carretera y aviones, hoy en día, no es viable. Y los desarrollos de nuevos aparatos para el transporte implican hasta 25 años. En el caso del hidrógeno verde, el problema es la distribución de este material en una red de abastecimiento. Sin el uso de biocombustibles a gran escala, no va a ser posible la reducción de las emisiones de GEI para lograr los objetivos de neutralidad climática en 2050.

2.3. Proceso de gasificación

Una vez explorado el panorama actual del transporte en el turismo, se van a explicar y exponer las diferentes alternativas para la fabricación de gas de síntesis para ser utilizado como molécula plataforma para la obtención de biocombustibles.

La gasificación de biomasa es el proceso termoquímico que se produce en ausencia de oxígeno, convirtiendo biomasa en gases, alquitrán y ceniza. Si se utiliza biomasa lignocelulósica en el proceso, la celulosa se convierte en gases más ligeros como monóxido de carbono e hidrógeno, que se conoce como gas de síntesis. El agente gasificante aporta calor y oxígeno para iniciar las reacciones de gasificación.

La gasificación puede aplicarse como un proceso para sintetizar combustibles líquidos de alta calidad mediante el proceso posterior conocido como Fischer-Tropsch. (IDAE, 2007a)

El rendimiento del proceso varía entre el 70-80%, dependiendo de la biomasa, agente gasificante y proceso de transformación utilizado.

2.3.1. Etapas

La gasificación de la biomasa pasa por cuatro etapas principales (IDAE, 2007a):

- **Evaporación:** Calentamiento inicial hasta aproximadamente 100 °C, que provoca el secado de la biomasa al evaporar el agua contenida en ella. Durante esta etapa, se absorbe calor para elevar la temperatura y para la evaporación del agua.
- **Pirólisis:** Durante esta etapa, las moléculas grandes se descomponen en moléculas más pequeñas, que se encuentran en fase gaseosa a la temperatura del reactor. La biomasa se descompone térmicamente en ausencia de oxígeno o con una baja concentración de un agente oxidante. Durante este proceso, se generan compuestos

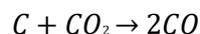
gaseosos, líquidos y sólidos. Se inicia la formación de gas de síntesis, principalmente monóxido de carbono e hidrógeno, en la fracción gaseosa. Además, las reacciones de craqueo ayudan a descomponer aún más la biomasa, aumentando la producción de productos gaseosos. Aunque la formación del gas de síntesis comienza en esta etapa, las fracciones líquidas y sólidas continúan reaccionando para producir más gas de síntesis y otros productos volátiles. (Suero Martín, 2021)

- **Reducción:** En esta etapa, el vapor de agua generado en la primera etapa se combina con el dióxido de carbono arrastrado por la corriente del gasificante, proveniente de la etapa de oxidación. La reducción ocurre en la etapa de descomposición térmica de la biomasa y en la conversión de los componentes carbonosos en productos gaseosos.
- **Oxidación:** Durante esta fase, la fracción carbonosa de la biomasa se oxida al entrar en contacto con el agente gasificante (aire, oxígeno o vapor de agua). Ocurre en la etapa de reformado de vapor, donde el oxígeno o el vapor de agua pueden reaccionar con los productos carbonosos para formar CO y H₂.

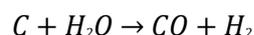
2.3.2. Reacciones químicas

Las reacciones químicas que se llevan a cabo en la etapa de gasificación son: (Rivera Cueva, 2016)

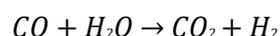
- **Reacción de Boudouard:** En esta reacción, el dióxido de carbono (CO₂) se disocia en monóxido de carbono (CO) y un compuesto de carbono activado. Esta reacción es reversible y puede producir CO₂ y carbono activado si no se controla adecuadamente.



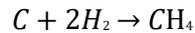
- **Reacción con vapor de agua:** El carbono reacciona con el vapor de agua (H₂O) para producir CO y H₂. Esta reacción también puede generar carbono activado, que luego puede reaccionar para producir más CO.



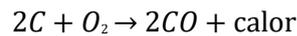
- **Reacción de transición:** Esta reacción ocurre entre el vapor de agua y un producto intermedio obtenido en la gasificación. Aumenta el contenido de hidrógeno y CO y es endotérmica.



- **Reacción de metanización:** El carbón se gasifica en una atmósfera de hidrógeno para producir metano (CH₄).



- **Reacciones del char:** Esta reacción es exotérmica y proporcionan el calor necesario para la gasificación. La combustión parcial del char con oxígeno (O₂) produce CO y calor, lo que contribuye significativamente al proceso de gasificación.



En la etapa de gasificación propiamente dicha, dada la reversibilidad de la mayoría de las reacciones, la temperatura influye en los equilibrios de reacción. En general para distintos combustibles puede decirse que el aumento de temperatura favorece el aumento del contenido en el gas producto de H₂ y CO en detrimento del CH₄ y del H₂O.

2.4. Características de la biomasa en el proceso de gasificación

Los biocombustibles de segunda generación se producen a partir de materias primas no alimentarias como residuos agrícolas. Son más sostenibles porque reducen los gases de efecto invernadero y no compiten con los cultivos alimentarios por tierras de cultivo. Ejemplos de biocombustibles avanzados incluyen biodiesel, biocombustible para aviones (SAF) y biobutanol, y son compatibles con la infraestructura de distribución de combustibles existente. El objetivo a largo plazo es producir biocombustibles avanzados a partir de materias primas sostenibles y abundantes. (Paul Baker, et al., 2017).

En cuanto a la biomasa a utilizar en el proceso de gasificación, deberá cumplir (IDAE, 2007a):

- Posibilidad de utilizar cualquier tipo de biomasa siempre que la densidad sea al menos de 250 kg/m³.
- El tamaño tiene que ser homogéneo y la alimentación estable en el tiempo. Cuanto menor sea el tamaño, mejor es la calidad del gas de síntesis y menor el tamaño del reactor, siendo el tamaño ideal entre los 2-3 mm.
- Humedad de la biomasa entre el 10-15%, ya que la humedad facilita la producción de hidrógeno.

2.5. Reactores de gasificación

Existen distintos tipos de reactores de gasificación según el flujo de la biomasa, agente gasificante y el tipo de lecho. Los tipos de reactores más habituales son:

2.5.1. Reactores de Lecho fijo:

- Lecho fijo de flujo ascendente en contracorriente o **Updraft**: Este tipo es común y simple. La materia sólida se introduce desde arriba y desciende en contra de la corriente del agente gasificante. Produce un gas de síntesis con poder calorífico medio pero alto contenido de alquitrán (10-20%), lo que requiere una limpieza exhaustiva para su uso en la recuperación de energía.
- Lecho fijo de flujo descendente en equicorriente o **Downdraft**: Similar al anterior, pero el agente gasificante y el combustible se mueven en la misma dirección. Produce un gas de síntesis con poder calorífico moderado y bajo contenido de alquitrán (0.1%), aunque con alto contenido de partículas.
- Lecho fijo en corrientes cruzadas o **Crossdraft**: Combina aspectos de los dos tipos anteriores. La alimentación desciende mientras que el agente oxidante se mueve lateralmente al gasificador. Produce un gas de síntesis con alto contenido de alquitrán a temperaturas de 800-900 °C.

2.5.2. Reactores de lecho fluidizado:

Por otro lado, los gasificadores de lecho fluidizado surgieron para solucionar los problemas de los reactores de lecho fijo. Son indicados para grandes instalaciones de gasificación y se dividen en cuatro tipos principales:

- Lecho fluidizado burbujeante: Flexible y fácil de operar, puede manejar diversas materias primas. Produce un gas de síntesis con poder calorífico moderado y bajo contenido de alquitrán, aunque con muchas partículas.
- Lecho fluidizado circulante: Similar al burbujeante, pero mejora el mezclado entre el oxidante y la biomasa. Produce un gas de síntesis con pocas partículas, pero alto contenido de alquitrán.

- Lecho fluidizado circulante interno: Mejora aún más el mezclado entre la biomasa y el gas mediante un distribuidor de gas de fluidización especial. Produce un gas de síntesis con un contenido moderado de alquitrán.
- Lecho fluidizado doble: Utiliza dos reactores: uno para gasificar la alimentación con vapor y otro para quemar el alquitrán formado con aire para producir calor. El gas de síntesis producido tiene un poder calorífico moderado, pero requiere limpieza previa para su uso en motores o turbinas.

Además de los reactores de lecho fijo y lecho fluidizado, existen otros tipos de reactores para la gasificación, como los reactores de plasma y los reactores de lecho móvil.

Las condiciones de uso de los diferentes reactores vienen resumidas en la tabla 4:

Tabla 4: Condiciones de uso de los reactores de gasificación según la tecnología

	Lecho móvil		Lecho fluidizado burbujeante	Lecho fluidizado circulante	Lecho arrasado
	Downdraft	Updraft			
Temperatura de operación (°C)	700 – 1200	700 – 900	850 – 950	850 – 1000	1500
Control de proceso	Simple	Muy simple	Moderado	Complejo	Moderado
Capacidad óptima (MW)	0,2 – 5	5 – 20	1 – 20	> 20	> 100
Humedad máxima (% en base húmeda)	25	60	40	40	15
Cenizas máxima (% en base seca)	6	50	20	15	5
Tamaño partículas mínimo (mm)	40 – 100	10 – 250	-10,0	1,0 – 10,0	0,1 – 1,0
Morfología del combustible	Uniforme	Heterogéneo	Molido	Molido	Pulverizado
Densidad aparente (kg/m ³)	> 500	> 400	> 100	> 100	> 400
Temperatura gas de salida (°C)	700	200 – 400	700	700	1000
Contenido alquitranes (g/Nm ³)	0,015 – 3,0	30 – 150	1 – 2	1 – 2	0,01 – 0,05
Eficiencia de gas caliente, η_{GC} (%)	75 – 80	80 – 85	80 – 90	80 – 90	85 – 90
Eficiencia de gas frío, η_{GF} (%)	65 – 75	40 – 60	60 – 70	60 – 70	60 – 70
Presión típica de operación (bar)	1	1	1	20 – 70	20 – 70
Agente gasificante típico	Aire/agua	Aire/agua	Aire/agua	Oxígeno/agua	Oxígeno/agua
PCI del gas (MJ/Nm ³)	4,5 – 5,0	5,0 – 6,0	5,0 – 5,5	15 – 20	15 – 22

Fuente: (Tobío-Pérez, Y. et al., 2020)

2.6. Agentes gasificantes

Los agentes gasificantes facilitan las reacciones químicas que convierten la biomasa en gas combustible, proporcionando el oxígeno necesario para la combustión parcial de la materia carbonosa. En este proceso, la biomasa se descompone térmicamente en presencia del agente gasificante, produciendo una mezcla de gases. El agente gasificante puede influir en la

composición y la calidad del gas de síntesis producido, así como en la eficiencia y la cinética del proceso de gasificación. Los tipos de agentes gasificantes son (IDAE, 2007a):

Aire:

- Proporciona oxígeno para una combustión parcial que energiza la gasificación.
- Gas de síntesis resultante con contenido energético medio (4-10 MJ/Nm³).
- Se usa como combustible en aplicaciones industriales.

Oxígeno:

- Produce un gas de síntesis con mayor contenido energético (10-15 MJ/Nm³) al no estar diluido con nitrógeno.
- Útil en la producción de compuestos orgánicos tras tratamiento adecuado.

Aire/Oxígeno + Vapor de agua:

- Vapor de agua enriquece el gas de síntesis con hidrógeno y monóxido de carbono.
- Aumenta ligeramente el contenido energético (10-20 MJ/Nm³).
- Utilizado en la síntesis de metanol, amoníaco y combustibles líquidos.

Hidrógeno:

- Utilizado con catalizadores, produce un gas de síntesis con alto contenido energético (>30 MJ/Nm³).
- Favorece la formación de metano y olefinas.

El producto obtenido mediante gasificación es una combinación de gases cuyo contenido puede incluir CO, H₂, CH₄, CO₂, N₂ y otros hidrocarburos ligeros en distintas proporciones, y se denomina gas de síntesis. La composición del gas varía según las condiciones de reacción (temperatura, presión, agente gasificante, tiempo), el tipo de reactor (lecho fijo updraft y downdraft, lecho fluido, arrastre de gas) y los sistemas de purificación utilizados. (IDAE, 2007a). El poder calorífico del gas principalmente proviene de la presencia y cantidad de CO, H₂ y CH₄. La concentración de H₂ suele estar entre 27 – 50 % mol, y el CO se sitúa entre el (30 – 60) % mol. (Suero Martín, 2021).

2.7. Catalizadores

Los catalizadores desempeñan un papel esencial en la gasificación de biomasa al mejorar la eficiencia del proceso mediante la aceleración de reacciones químicas clave. Además, ayudan

a reducir la formación de subproductos no deseados, como alquitranes y compuestos de azufre, que pueden obstruir equipos y comprometer la calidad del gas de síntesis. Además, los catalizadores favorecen la formación de gases combustibles deseables, como hidrógeno y monóxido de carbono, mientras se minimiza la producción de otros productos no deseados, como dióxido de carbono. Los tipos de catalizadores que se utilizan en el proceso de gasificación son: (IDAE, 2007a)

- Catalizadores de reformado de níquel o cobalto: Se emplean a temperaturas inferiores a 550 °C para facilitar el craqueo de fracciones pesadas y reducir la formación de alquitranes.
- Catalizadores basados en zeolita y dolomía: Reducen la temperatura de craqueo de 1.100 °C a 800-900 °C, permitiendo trabajar a temperaturas más bajas en la zona de reducción.
- Catalizadores de níquel y cobalto: Favorecen la formación de monóxido de carbono e hidrógeno y se utilizan entre 700 y 800 °C en la zona de reducción.

3. Objetivos del TFE

Se van a presentar los objetivos del presente trabajo, así como los objetivos específicos derivados del tipo de instalación propuesta, además de las particularidades de la biomasa y gas de síntesis obtenido.

3.1. Objetivo general

El objetivo de este trabajo es el diseño de una instalación para producción de **gas de síntesis** mediante **gasificación** de biomasa lignocelulósica de residuos agrícolas para su uso como **molécula plataforma** en los procesos de fabricación de biodiesel y bio-queroseno.

3.2. Objetivos específicos

La propuesta de este trabajo es una solución global para los dos medios de transporte mayoritarios en el turismo con la producción del elemento de base de los biocombustibles de próxima generación. Tiene como objetivo específico la obtención de gas de síntesis a través de procesos de gasificación a pequeña y mediana escala en zonas rurales. El uso de biomasa como combustible para la gasificación revalorizará un residuo que en otro caso habría que desechar.

Se va a evaluar la idoneidad del proceso de gasificación en la obtención del gas de síntesis, así como el tipo de reactor a utilizar y su viabilidad.

Una vez generado el gas de síntesis, éste será almacenado en tanques para la recogida en camiones cisterna y ser trasladado a una refinería para transformarlo en biocombustibles a través del proceso Fisher-Tropsch. De este último paso se generará biodiesel y/o bioqueroseno.

Una vez producidos ambos combustibles, ya sea en una o en varias biorrefinerías, se va a aprovechar la infraestructura de distribución de diésel y queroseno existente para la introducir los biocombustibles en el % estipulados por las normativas correspondientes, hasta conseguir la sustitución del 100% de los combustibles fósiles.

Como resumen, en este trabajo van a analizar los siguientes objetivos específicos:

- Evaluar el recurso renovable disponible en la península y verificar su idoneidad para ser utilizado como combustible en el proceso de gasificación.
- Proponer el proceso de gasificación idóneo para la obtención de gas de síntesis con unas condiciones de funcionamiento ideales
- Diseñar una instalación comercial con la fabricación de gas de síntesis, mediante gasificación a partir de residuos de biomasa lignocelulósica (forestal y agraria)
- Evaluar la biomasa necesaria y el gas de síntesis obtenido
- Analizar económica y medioambientalmente la propuesta realizada
- Estudiar los resultados obtenidos y ver si es posible esta propuesta a gran escala, viendo sus ventajas e inconvenientes.

4. Hipótesis de trabajo

La premisa de la que parte este trabajo es la de obtener gas de síntesis para la producción de biocombustibles a partir de residuos de biomasa generados en los procesos agrícolas en el territorio de la península ibérica. La localización de la planta de producción (o plantas) dependerá de la posibilidad de obtener la biomasa necesaria para la producción diaria y de la distancia a las plantas de refinado del gas de síntesis. Pero como se va a poder comprobar en el apartado del análisis del recurso renovable, la elección de este está condicionada a que éste pueda estar disponible en casi cualquier punto de la geografía española y con ello poder localizar la planta en cualquier punto.

Por lo que, las hipótesis que se van a plantear en el trabajo actual son:

- ¿Hay biomasa adecuada para la obtención de gas de síntesis a partir del proceso de gasificación? Si es así, ¿Hay suficiente biomasa en la zona donde se va a localizar la planta de gasificación?
- Una vez elegido el tipo de reactor de gasificador, ¿Las características del gas de síntesis cumplen con las necesarias para la producción posterior de biocombustibles mediante Fisher-Tropsch?
- ¿Se podrá producir suficiente gas de síntesis para que sea rentable su venta?
- ¿Será rentable la instalación de gasificación?
- ¿Cuáles serán los impactos ambientales de la planta propuesta?

5. Requisitos de diseño

Para la obtención de gas de síntesis, se ha seleccionado el proceso de gasificación de biomasa. Además de los requisitos técnicos necesarios para el proceso de gasificación, es necesario la evaluación de las condiciones de funcionamiento idóneas para la obtención del gas de síntesis. Posteriormente se caracteriza el gas de síntesis obtenido para verificar que cumple con las condiciones necesarias para su posterior transformación en biocombustible a través del proceso Fisher-Tropsch.

5.1. Proceso de gasificación

Es necesario evaluar el tipo de biomasa a utilizar, así como el lugar de localización de la planta de gasificación y el tipo de reactor de gasificación, catalizadores y agentes gasificantes, para cumplir con los objetivos propuestos.

5.1.1. Biomasa

La biomasa será lignocelulósica. El tipo a utilizar en el proceso de gasificación va a depender de la disponibilidad de esta en la zona de implantación de la instalación, siempre y cuando cumpla las condiciones necesarias para el proceso de gasificación, las cuales han sido expuestas en el estado del arte. Más adelante se evaluará la disponibilidad de la biomasa elegida en la península española.

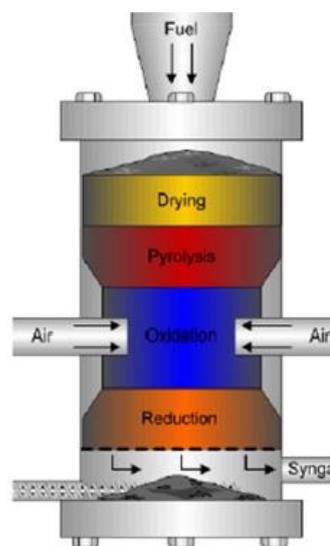
5.1.2. Localización de la planta

Como se verá en la evaluación de la biomasa, la elegida será lignocelulósica, y en concreto de residuos de cereal. Para poder establecer la planta, va a evaluar en el apartado del recurso energético, la disponibilidad de este recurso a lo largo de toda la península. Por lo que se puede elegir localización cualquier región de producción de cereales. Y como preferencia se sugiere el localizarla en zonas de Castilla y León, Castilla-La Mancha, Aragón y Extremadura.

5.1.3. Reactores de gasificación

Para este proyecto, se elige un reactor de lecho fijo tipo downdraft al ser el más adecuado para aplicaciones de menor escala, de fácil control. Es eficiente en la conversión de biomasa lignocelulósica en gas de síntesis. Además, en el mercado existen con modelos comerciales de este tipo de reactor, uno de los cuales será analizado posteriormente. En la figura 8 se puede ver donde se localizan las reacciones del proceso de gasificación descritas en el estado del arte según del gasificador elegido.

Figura 8: Gasificador tipo downdraft. Reacciones en la gasificación por zonas



Fuente: (IDAE, 2007a)

5.1.4. Agentes Gasificantes

El agente gasificante ideal sería una mezcla de aire y vapor de agua para obtener un gas de síntesis con mayor proporción de CO y H₂. Este agente es el más adecuado para producir gas de síntesis si se planea utilizar como materia prima para producir biocombustibles. (IDAE, 2007a). Por lo que la elección de gasificante vapor de agua sería la idónea ya que se persigue la obtención a un precio razonable de un gas de síntesis apto para su conversión en biocombustible. En el caso de estudio para el cálculo de la instalación comercial se usa solamente aire como agente gasificante, al ser el predeterminado y por ello se va a obtener un gas de síntesis rico en nitrógeno, que tendrá que ser eliminado posteriormente en la refinería.

5.1.5. Catalizadores

Nuevamente, debido a que la instalación que se propone es de tamaño medio, barata para poder ser instalada como opción para la revalorización de los residuos agrícolas, además de la necesidad de producir un gas de síntesis con bajo contenido metano, se elige catalizador de níquel, como condición ideal de funcionamiento. La ventaja del níquel es su capacidad para facilitar el reformado del metano, lo que ayuda a ajustar la relación entre carbono e hidrógeno (C/H₂) en el gas de síntesis producido durante la gasificación. Además, es eficaz para reducir la formación de alquitrán durante la gasificación. Los alquitranes son subproductos no deseados que pueden obstruir equipos y afectar la eficiencia del proceso. Otra ventaja importante del níquel es su disponibilidad y bajo costo en comparación con otros metales preciosos o menos comunes. Esto lo convierte en una opción económicamente viable. (Rivera Cueva, 2016), (Sánchez Bastardo, 2014). Será una de las propuestas de mejora de la instalación calculada. Los cálculos se van a realizar sin el uso de catalizador.

5.2. Condiciones ideales de funcionamiento

Una vez seleccionada la materia prima, el tipo de reactor, el agente gasificador y el catalizador, se determinan las condiciones en las condiciones de trabajo del reactor:

- La presión de trabajo para gasificadores de lecho móvil como el seleccionado es a presión atmosférica.
- La temperatura de trabajo a elegir va a estar condicionada por la elección del catalizador y el obtener la mayor proporción de gases CO/H frente a CH₄. Por ello se ha elegido una temperatura de pirólisis de 750°C y de 800°C en el proceso de gasificación. (Sánchez Bastardo, 2014). Debido a que ambos se producen en el mismo reactor, la temperatura será de 800°C.
- En cuanto al tiempo de cada etapa: (Bilbao Duñabeitia, 2009)
 - Pirólisis: En un proceso convencional, el tiempo de reacción está entre 5 y 30 minutos, dependiendo del tamaño del reactor. Y los productos obtenidos en esta primera etapa son gas y un sólido que pasaría a la siguiente etapa de gasificación dentro del mismo reactor.
 - Gasificación: esta etapa puede llevar desde minutos hasta varias horas, y viene determinado por el tamaño del reactor y el caudal de alimentación de la

biomasa. La relación entre el tiempo de residencia, biomasa en el lecho y caudal de alimentación van a depender de la etapa dominante del proceso.

5.3. Gas de síntesis obtenido

El gas obtenido del proceso de gasificación contiene principalmente impurezas como partículas sólidas (char no convertido y ceniza), impurezas inorgánicas (componentes sulfurados y de nitrógeno) e impurezas orgánicas (alquitrán, compuestos aromáticos y dióxido de carbono).

Estas impurezas deben ser tratadas o eliminadas para obtener un gas limpio y utilizable en procesos posteriores. En el presente trabajo, el proceso se va a terminar una vez eliminadas las partículas en suspensión del gas de síntesis mediante un ciclón. El resto de los procesos, de elevado coste, se propone la realización en refinerías donde cuentan con procesos con alto grado de eficiencia. De esta forma se pretende obtener una instalación rentable con una calidad de gas de síntesis aceptable.

Una vez filtrado el gas, será almacenado en tanques de acero inoxidable a 20 bar de presión, a la espera de ser recogidos mediante camiones cisterna para ser transportado a refinerías. La compresión del gas obtenido a 20 bar viene determinada por la presión a la cuál es transportado a la planta para su refino (*Lapesa, s. f.*).

Tras el transporte del gas de síntesis a la refinería, se propone realizar el proceso de Fisher-Tropsch para la obtención de biodiesel y bioqueroseno, ambos biocombustibles que pueden ser utilizados en autobuses o aviones en el transporte de turistas, como viene reflejada en la tabla 5. En ella se puede ver la comparativa entre los distintos tipos de procesos de transformación para la obtención de biocombustibles y que el proceso Fisher-Tropsch es el adecuado para la biomasa de residuos de agricultura:

Tabla 5: Procesos para la obtención de biocombustibles

Fuel Conversion Process	Fuel Feedstock	ICAO Core LCA Emissions (g CO ₂ e/L)	ILUC Emissions (g CO ₂ e/L)	WTT Emissions (g CO ₂ e/L)	TTW Emissions (g CO ₂ e/L)	WTW Emissions (g CO ₂ e/L)
N/A	Conventional Jet Fuel ¹⁰	N/A	0	549	2,525	3,074
Fischer-Tropsch	Agricultural Residues	257	0	257	2	259
	Forestry Residues	277	0	277	2	279
	Municipal Solid Waste (MSW) - 0% Non-Biogenic Carbon (NBC)	174	0	174	2	176
	MSW - 50% NBC ¹¹	2,985	0	1,842	1,179	3,021
Hydro-Processed Esters and Fatty Acids	Tallow	751	0	751	2	753
	Used Cooking Oil	464	0	464	2	466
	Corn Oil from Dry Mill Ethanol Plant	574	0	574	2	576
	Soybean Oil	1,348	818	2,167	2	2,169
	Soybean Oil	1,348	901	2,250	2	2,252
	Rapeseed Oil	1,582	805	2,387	2	2,389
	Palm Oil - Closed Pond	1,249	1,305	2,554	2	2,556
	Palm Oil - Closed Pond	2,003	1,305	3,308	2	3,310
Alcohol (Isobutanol) to Jet	Agricultural Residues	978	0	978	2	980
	Forestry Residues	795	0	795	2	797
	Sugarcane	801	244	1,045	2	1,047
	Corn Grain	1,863	738	2,601	2	2,603
Alcohol (Ethanol) to Jet	Sugarcane	506	183	1,095	2	1,097
	Corn Grain	1,380	527	3,031	2	3,033
Synthetic Isoparaffins	Sugarcane	1,120	386	1,472	2	1,474
	Sugar Beet	1,110	690	1,756	2	1,758

Fuente: (US department of energy, 2020)

El combustible obtenido tras el refinado del gas de síntesis y posterior proceso de transformación deberá cumplir las siguientes normativas de biocombustibles:

- Biodiesel: Real Decreto 1597/2011, de 4 de noviembre
- Bioqueroseno: ASTM International (ASTM) D7566-approved SAFs

6. Metodología

En los siguientes apartados se van a detallar las metodologías utilizadas para el cálculo de la instalación de gasificación, así como la evaluación de la aptitud o no de la biomasa seleccionada. Adicionalmente, se van a introducir los procesos posteriores, tanto de transporte del gas de síntesis obtenido como los posibles procesos de refinado necesarios para la transformación del gas en biocombustibles.

6.1. Biomasa

Al no disponer de muestras propias para la evaluación del recurso, se van a comparar las características fisicoquímicas de distintos recursos de paja de cereal de dos estudios, y ver si se cumplen las condiciones necesarias para la utilización como combustible en el proceso de gasificación.

Se compararán las características que se obtienen a través del análisis elemental (obtención de los porcentajes de carbono, hidrógeno, nitrógeno, azufre, cloro y oxígeno de cada muestra). Además, se compararán la cantidad de humedad presente en la paja de cereal, y con estos datos se va a calcular el poder calorífico mediante la ecuación de Milne. Este dato se comparará entre muestras y se verificará si su valor es suficiente para el uso de la paja como materia prima en la gasificación.

Los pretratamientos necesarios para la alimentación en el reactor estarán en función de las necesidades de este, determinados por el tamaño de la biomasa en la alimentación y la densidad del producto alimentado. Para ello será necesario la caracterización de la biomasa para comprobar que cumple con estos requisitos.

También se va a calcular el almacenamiento de la biomasa en pacas y una vez ha sido pretratado mediante molienda, dependiendo de la necesidad diaria de biomasa en el proceso de gasificación.

6.2. Proceso de gasificación

La elección del reactor va a depender de los tipos de reactores para gasificación. La elección del tipo lecho móvil tipo Downdraft va a venir determinada por su ventaja en cuanto a sencillez

en el funcionamiento. Se va a elegir un gasificador comercial de tamaño medio de este tipo, para poder calcular, a partir de las características de la biomasa de paja de cereal y las características tecnológicas del gasificador, los productos obtenidos.

Se van a estudiar las etapas en el proceso de gasificación, proponiendo mejoras en el proceso según otros estudios consultados. Estas mejoras estarán centradas en las condiciones de funcionamiento, agentes gasificantes y catalizadores posibles.

Se van a determinar la relación estequiométrica entre la paja de cereal y el agente gasificante necesarias para llevar a cabo del proceso de gasificación. También se va a valorar si con el uso de la biomasa elegida se cumplen los rangos de composición de gas de síntesis que ofrece el fabricante. Con estos rangos se va a calcular el balance de masa para saber la cantidad de productos obtenidos: gas de síntesis y cenizas.

Con la cantidad de productos obtenidos se podrá valorar si el rendimiento de la instalación está dentro de los rangos del fabricante y si este rendimiento es suficiente para hacer viable la instalación. Una vez realizados estos cálculos y comparativas, se va a estudiar las necesidades tanto de almacenamiento de biomasa por día de funcionamiento de gasificador como el tipo de almacenamiento y transporte del gas de síntesis generado.

6.3. Procesos posteriores

Finalmente, en las conclusiones se van a proponer que mejoras y cambios se podrían aplicar a una planta de gasificación, dependiendo de las características del gas de síntesis que se busca obtener.

También se van a dar algunas ideas de los procesos posteriores a los que someter al gas de síntesis para su conversión en biocombustible, que serán realizados en la planta de refinamiento del gas de síntesis. Estos serán los siguientes:

- Water Gas Shift
- Proceso Fischer-Tropsch

Ambos procesos se comentarán brevemente en el apartado de mejoras del proceso.

Otro aspecto a valorar del proyecto es el transporte del gas de síntesis desde la planta de producción a la planta de refino, en las conclusiones se aportan reflexiones sobre este punto.

7. Evaluación del recurso renovable

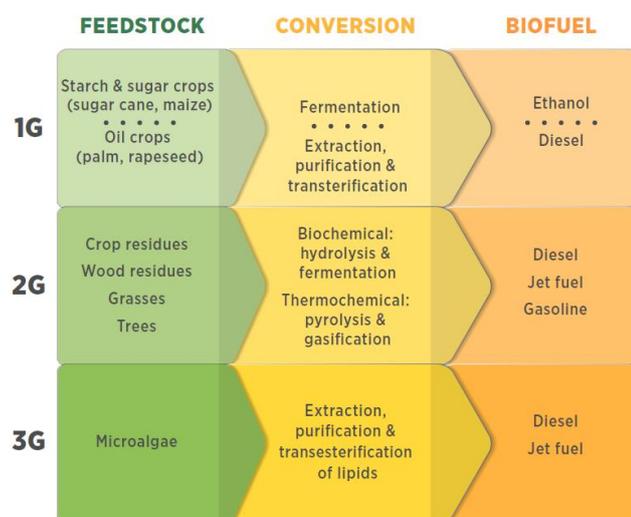
Una pieza clave a la hora de proponer una instalación de gasificación es la disponibilidad de la biomasa que va a ser utilizada en la misma. A continuación, se va a valorar el tipo de biomasa lignocelulósicas presentes en el territorio peninsular y su disponibilidad, además de caracterizar las disponibles para ser utilizadas para obtener gas de síntesis.

7.1. Biomasa disponible en España

Los biocombustibles de segunda generación utilizan materias primas lignocelulósicas como residuos agrícolas y forestales, pastos y árboles. Algunas de estas materias primas pueden tener rendimientos altos, secuestrar carbono y crecer en tierras poco aptas para cultivos alimentarios. Se convierten en biocombustibles mediante tecnologías bioquímicas y termoquímicas (The International Renewable Energy Agency, 2016).

La biomasa lignocelulósica se caracteriza por estar compuesta por celulosa, hemicelulosa y lignina, y sus proporciones varían según el tipo de materia vegetal de la que se extraiga el residuo. En la figura 9 se puede ver la comparativa entre el tipo de biomasa seleccionado, el proceso de transformación idóneo y el tipo de biocombustible obtenido. En ella propone que la biomasa proveniente de residuo de cereal se puede de convertir a través del proceso de gasificación en biodiesel y biocombustible para aviación.

Figura 9: Conversión de la biomasa en biocombustibles según el tipo de biomasa



Fuente: (The International Renewable Energy Agency, 2016)

La producción simultánea de alimentos y combustibles es viable, ya que el aumento de la producción agrícola para satisfacer las necesidades nutricionales crea también una mayor cantidad de residuos agrícolas. Estos residuos, tanto de la cosecha como del procesamiento, pueden ser recolectados de manera sostenible sin comprometer la regeneración del suelo, lo que potencialmente aumenta la producción de alimentos y combustibles. (The International Renewable Energy Agency, 2016).

Las ventajas del uso de los residuos forestales y agrícolas frente al uso de cultivos energéticos son:

- Economía circular: Los residuos son utilizados en un proceso en el cual el productor puede recibir remuneración económica por ellos en lugar de tener que afrontar los gastos para su eliminación.
- Eliminar el debate entre elegir entre plantar para producir biocombustibles frente a plantar para comer. (Paul Baker, et al., 2017)
- Los residuos agrícolas y forestales, compuestos por lignocelulosa son la mejor alternativa de biomasa para la fabricación de queroseno a partir de gasificación, incluso con mejor rendimiento que el uso del gas de síntesis para la producción de electricidad. (US department of energy, 2020).

En este trabajo se va a contemplar solo el uso de biomasa lignocelulósica residual, ya su uso contribuye a la economía circular y a la revalorización de residuos. La producción de residuos totales de biomasa proveniente de agricultura en España en 2020 fue de 23 millones de toneladas en base seca, y la previsión para los próximos años es de mantener esta cifra constante hasta 2025. En cuanto a la forestal, la cantidad es de 2,5 millones de toneladas en 2020 manteniéndose constante en los siguientes años (Carraro et al., 2021).

7.2. Tipos de residuos de biomasa

El Plan de Energías Renovables estima recursos potenciales de biomasa en alrededor de 19.000 ktep. Más de 13.000 ktep provienen de biomasa residual (IDAE, 2007b). En el estudio se van a considerar los siguientes tipos de biomasa lignocelulósica, y su procedencia (Subsecretaría de Agricultura, Pesca y Alimentación et al., 2023):

- **Residuos forestales:** se generan en actividades como la limpieza, poda y corta de árboles, destinadas a mejorar y gestionar las masas vegetales. Estos residuos, que incluyen ramas y restos de madera, son utilizables como combustibles debido a sus propiedades energéticas favorables. Se producen en todas las regiones forestales de España, incluyendo áreas como el norte de España (Galicia, Asturias, Cantabria, País Vasco), así como en zonas de bosques mediterráneos en el centro y sur del país (Andalucía, Castilla-La Mancha, Cataluña).
- **Residuos agrícolas leñosos:** provienen de las podas de olivos, viñedos y árboles frutales, son principalmente generados por las actividades de mantenimiento y cultivo en la agricultura. Son comunes en regiones con una fuerte presencia de cultivos leñosos, como olivares, viñedos y huertos de árboles frutales. Por lo tanto, se encuentran principalmente en Andalucía (olivares), La Rioja (viñedos), Aragón, Cataluña, y Valencia (cultivos frutales).
- **Residuos agrícolas herbáceos:** se producen durante la cosecha de cultivos como cereales (paja) o maíz (cañote). Las regiones con una mayor producción de cereales y maíz, como Castilla y León, Castilla-La Mancha, Aragón y Extremadura.
- **Residuos de industrias forestales y agrícolas:** astillas, cortezas y serrín de la transformación de la madera, así como huesos, cáscaras y otros desechos de la industria agroalimentaria, como aceite de oliva, conservas y frutos secos. Se producen en varias regiones de España, incluyendo Galicia, Asturias, Castilla y León, Extremadura, y Valencia, entre otras.

Para el aprovechamiento energético y transformación en gas de síntesis, necesitamos conocer los poderes caloríficos de la biomasa a tratar. En la tabla 6 se pueden ver los poderes caloríficos (PC) de productos susceptibles a ser utilizados como biomasa en España (IDAE, 2007b).

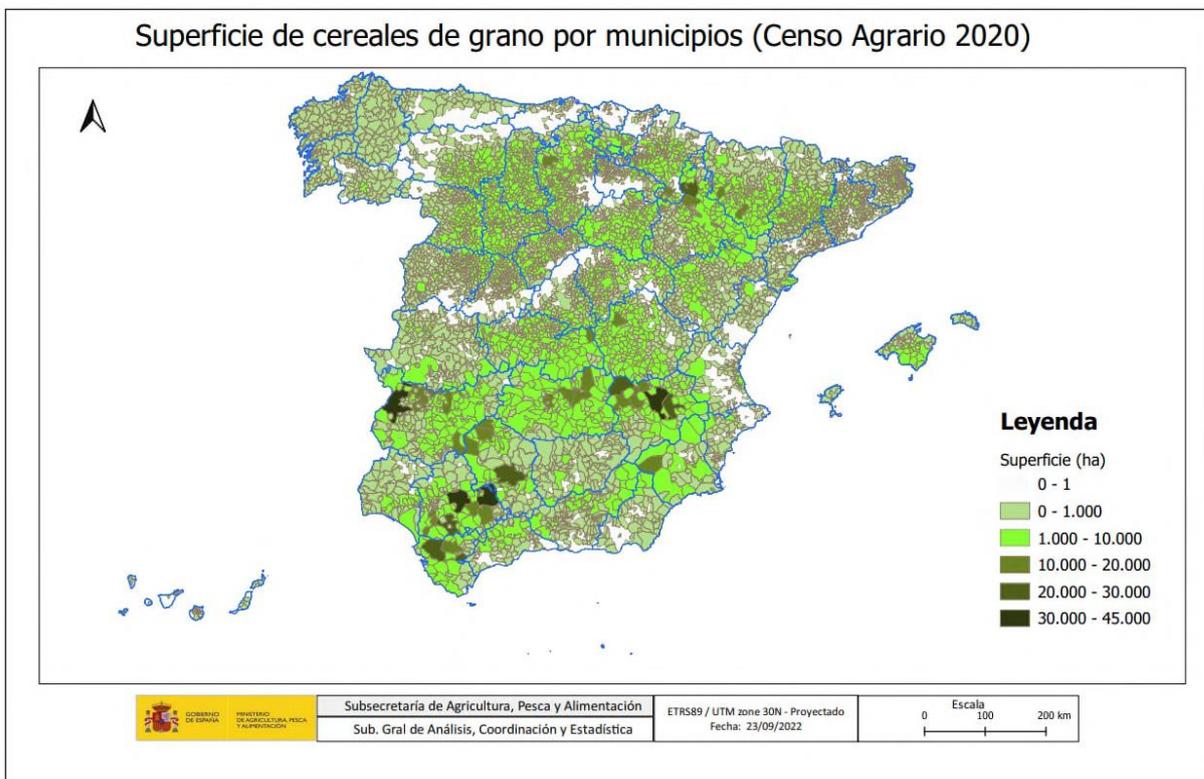
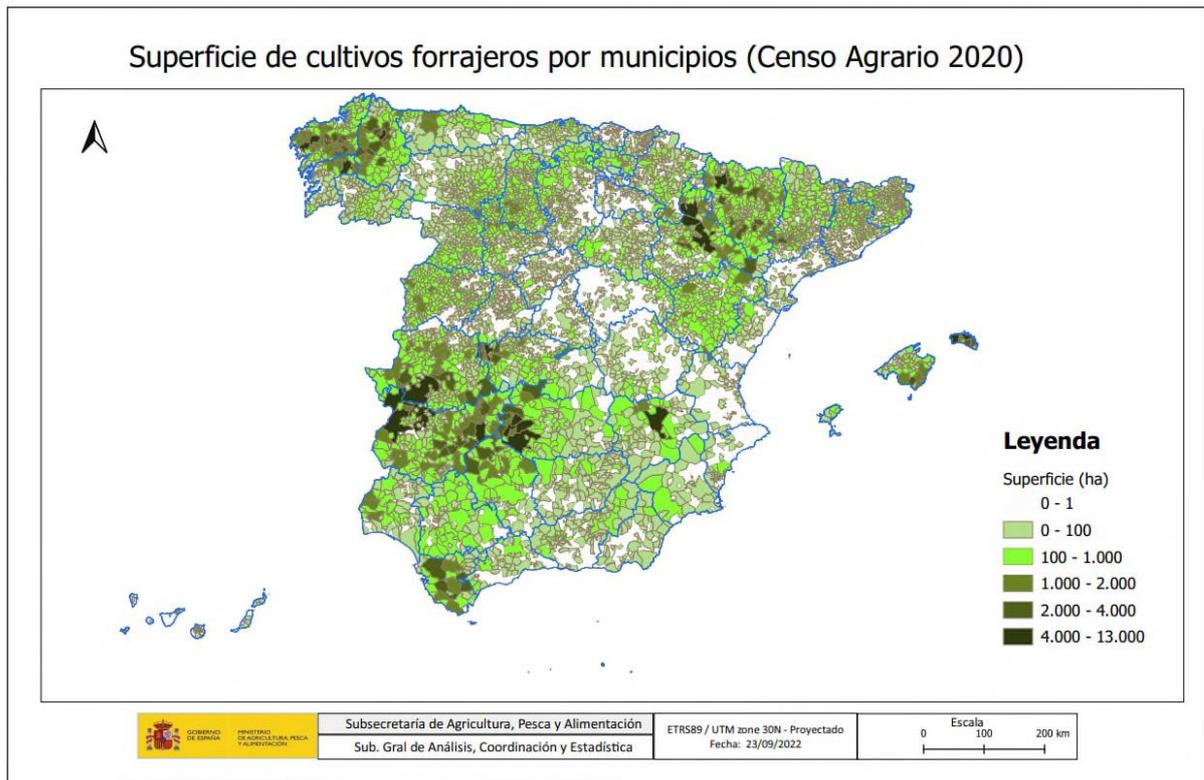
Tabla 6: Poder calorífico según tipo de biomasa en España.

Producto	PCS (kcal/kg) Humedad = 0%	PCI a la humedad x (kcal/kg)			
		x	PCI	x	PCI
<i>Leñas y ramas</i>					
Coníferas	4.950	20%	3.590	40%	2.550
Fronosas	4.600	20%	3.331	40%	2.340
<i>Serrines y virutas</i>					
Coníferas	4.880	15%	3.790	35%	2.760
Fronosas autóctonas	4.630	15%	3.580	35%	2.600
Fronosas tropicales	4.870	15%	3.780	35%	2.760
<i>Corteza</i>					
Coníferas	5.030	20%	3.650	40%	2.650
Fronosas	4.670	20%	3.370	40%	2.380
<i>Vid</i>					
Sarmientos	4.560	20%	3.280	40%	2.310
Ramilla de uva	4.440	25%	2.950	50%	1.770
Orujo de uva	4.820	25%	3.240	50%	1.960
<i>Aceite</i>					
Hueso	4.960	15%	3.860	35%	2.810
Orujillo	4.870	15%	3.780	35%	2.760
<i>Cáscaras frutos secos</i>					
Almendra	4.760	10%	3.940	15%	3.690
Avellana	4.500	10%	3.710	15%	3.470
Piñón	4.930	10%	4.060	15%	3.830
Cacahuete	4.250	10%	3.480	15%	3.260
<i>Paja de cereales</i>					
	4.420	10%	3.630	20%	3.160
	4.420	30%	2.700		
<i>Cascarilla de arroz</i>					
	4.130	10%	3.337	15%	3.150
<i>Girasol</i>					
<i>Residuo de campo</i>	4.060	10%	3.310	15%	3.090

Fuente: (IDAE, 2007b)

Para la instalación de gasificación se ha decidido seleccionar un tipo de biomasa que hay repartida en toda la geografía española de forma abundante. Esta condición la cumplen tanto la paja de cereales, leguminosas y forraje, como se pueden ver en las siguientes figuras. El potencial anual de paja en España de $1770 \cdot 10^3$ ton (Torben Skøtt/BioPress, et al., 2011)

Figura 10: Tipos de cultivos en la península ibérica en 2020.



Fuente: (Subsecretaría de Agricultura, Pesca y Alimentación et al., 2023)

La estructura de la materia lignocelulósica como la paja de cereal, está compuesta por los siguientes compuestos (Suero Martín, 2021):

- **Celulosa:** Es el principal componente del material lignocelulósico (35-55% de su masa total). Es un homopolímero de D-glucopiranosas unidas por enlaces β (1 \rightarrow 4), con alto grado de polimerización y resistente a la hidrólisis. Tiene función estructural en la pared celular.
- **Hemicelulosa:** Constituye la fracción azucarada restante de la pared celular (20-30% de la masa total). Es un heteropolímero ramificado con menor grado de polimerización que la celulosa. Su función principal es conectar la celulosa con la lignina.
- **Lignina:** Compuesta principalmente por unidades de p-hidroxifenilo, guayacilo y siringilo. Proporciona resistencia y protección contra la degradación química y biológica a la pared celular.
- **Proteínas:** Presentes en baja proporción (<5% de la masa total), son responsables de la presencia de nitrógeno y azufre en el material lignocelulósico.
- **Cenizas:** Compuestos inorgánicos que representan menos del 1% de la composición total.
- **Pectinas:** Relacionadas con la porosidad de la pared celular, compuestas principalmente por polisacáridos.

En el caso de la paja de cereales, la composición se distribuye de la siguiente manera:

Tabla 7: Composición de la paja de cereal

MATERIA PRIMA %	Paja de trigo	Paja de cebada
CELULOSA	40.7	33.1
XILANO	23.7	20.2
ARABINANO	1.3	3.8
GALACTANO	2.6	0.9
MANANO	-	-
LIGNINA	17	16.1

Fuente: (Suero Martín, 2021)

7.3. Caracterización de la paja de cereal

Para el uso como combustible en el proceso de gasificación, es necesario verificar que la paja de cereal cumple con los requerimientos necesarios. Para ello se van a realizar el análisis

elemental, la determinación del contenido en cenizas y el cálculo del poder calorífico de la biomasa.

7.3.1. Análisis elemental

Las propiedades iniciales del residuo a gasificar afectan el proceso termoquímico y dependen de diversos factores del residuo mismo. El análisis elemental, para la determinación de los elementos presentes en la biomasa como el carbono, hidrógeno, nitrógeno, azufre, cloro y oxígeno, influye en la proporción óptima de agente gasificante/residuo y en la producción de contaminantes como óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre y cloruro de hidrógeno. Para este trabajo, se han tomado los datos obtenidos mediante análisis termogravimétrico a partir del estudio que viene detallado en la tabla 8.

Tabla 8: Muestras de biomasa de cereal según análisis termogravimétrico

MUESTRA %	Carbono	Hidrógeno	Nitrógeno	Azufre	Oxígeno	cenizas
Trigo	47,87	6,81	0,72	0,053	44,447	6,52
Cebada cervecera	48,4	7,28	0,92	0,058	43,342	5,25
Cebada caballar	47,98	7,15	0,85	0,056	43,964	4,18
Centeno	50,08	6,99	0,46	0,024	42,446	1,93

Fuente: (Antolín Giraldo et al., 1989).

Si se atiende a una clasificación más general, la paja de cereal se puede clasificar en paja amarilla (recién cortada) y paja gris (ha sufrido lluvia antes de su recogida), tal y como viene reflejado en la tabla 9.

Tabla 9: Muestras de paja amarilla y paja gris. Análisis elemental

MUESTRA %	Carbono	Hidrógeno	Nitrógeno	Azufre	Oxígeno	cenizas	PC (MJ/kg)
Paja Amarilla	43	5	0,35	0,16	37	4	14.4
Paja Gris	43	5	0,41	0,13	38	3	15

Fuente: (Torben Skøtt/BioPress, et al., 2011)

7.3.2. Análisis de cenizas

El contenido de cenizas, material volátil y carbono fijo indica la cantidad de sólidos que deben eliminarse del gasificador por unidad de masa procesada. Se recomienda no superar un

contenido de cenizas del 10%, ya que estas deben ser retiradas para evitar acumulaciones que puedan obstruir equipos. En la tabla 10 muestran los valores obtenidos mediante análisis termogravimétrico del estudio de (Antolín Giraldo et al., 1989)

Tabla 10: Análisis elemental paja de cereal.

MUESTRA %	Humedad	Volátiles	Cenizas	Carbono Fijo
Trigo	5,69	73,11	5,69	21,29
Cebada cervecera	7,64	75,67	4,88	19,55
Cebada caballar	6,74	78,53	5,25	16,22
Centeno	5,78	81,57	1,93	16,5

Fuente: (Antolín Giraldo et al., 1989)

La humedad afecta la viabilidad y el balance térmico del proceso, ya que parte del calor producido se utiliza para evaporar el agua. Además, influye en la composición del gas de salida y puede desplazar algunas reacciones. Se aceptan humedades entre 10% y 15% para lechos móviles y hasta 40% para lechos fluidos. (IDAE, 2007b). Como se puede ver en la tabla 10, en ningún caso la humedad es superior al 10% para la paja de cereal analizado.

7.3.3. Poder Calorífico

El Poder Calorífico Superior (PCS) del combustible debe estar entre 15.000 y 21.500 kJ/kg, según IDAE, para su uso en el reactor de gasificación tipo downdraft. En tabla 4 se detallan los PCS según el tipo de residuo de paja de cereal según uno de los estudios consultados:

Tabla 4: Poder calorífico de muestras de paja de cereal

MUESTRA	PCS (kcal/kg)
Trigo	4398
Cebada cervecera	4478
Cebada caballar	4458
Centeno	4382

Fuente: (Antolín Giraldo et al., 1989)

Si Calculamos el PCS según la ecuación de Milne:

$$PCS_{BS} \text{ (MJ/kg)} = 0,314 * C \% + 1,322 * H \% - 0,12 * O \% - 0,12 * N \% + 0,0686 * S \% - 0,0153 * Z$$

Sustituyendo los valores, de composición elemental, se obtienen los valores de poder calorífico que vienen resumidas en la tabla 5.

Tabla 5: Tabla de cálculos del poder calorífico mediante fórmula Milne.

MUESTRA %	PCS (MJ/kg)	PCS (kcal/kg)
Trigo	18,643636	4455,94
Cebada cervecera	19,596547	4683,69
Cebada caballar	19,229976	4596,07
Centeno	19,871527	4749,41

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos del estudio de (Antolín Giraldo et al., 1989)

Si se comparan estos valores con los datos proporcionados por IDAE (ver tabla 6) en su informe sobre gasificación, el dato proporcionado por este organismo es ligeramente inferior al obtenido en el estudio mencionado anteriormente:

Tabla 6: Extracto de los datos del poder calorífico de la paja de cereales

Producto	PCS (kcal/kg) Humedad = 0%	PCI a la humedad x (kcal/kg)			
		x	PCI	x	PCI
Paja de cereales	4.420	10%	3.630	20%	3.160
	4.420	30%	2.700		

Fuente: (IDAE, 2007b)

En cuanto a los resultados del estudio del uso de la paja para energía (Torben Skøtt/BioPress, et al., 2011), los datos según paja amarilla y paja gris vienen detallados en la tabla 7:

Tabla 7: Resultados del poder calorífico de muestras de paja.

MUESTRA %	PC (MJ/kg)
Paja Amarilla	15,61561
Paja Gris	15,518626

Fuente: (Torben Skøtt/BioPress, et al., 2011)

De ambos estudios consultados, el estudio de la paja según su clasificación en amarilla o gris (Torben Skøtt/BioPress, et al., 2011) es más genérico y depende del tipo de cereal contemplado, mientras que el estudio de caracterización de la paja de cereal (Antolín Giraldo

et al., 1989) es más completo y se refiere a paja de la zona de Castilla y León. Y si se toma como referencia el dato proporcionado por el IDAE, el PC de la paja de cereal es de 18,5 MJ/kg. Por lo que según este estudio estaríamos dentro del límite del uso del gasificador de lecho fijo tipo Downdraft.

7.4. Pretratamiento combustible

Los residuos de cereal son recogidos y empacados en el campo, para su posterior manipulación. Las pacas de paja de cereal suelen ser de alta densidad: 100 - 300 Kg/ m³

- Paca rectangular clásica. Dimensiones aproximadas de (80- 100) x 40 x 40 cm, peso: 20 -50 kg
- Paca rectangular gigante. Dimensiones aproximadas de (90- 120) x 100 x 210 cm, peso: 200 – 300 kg. Por su dimensión y peso, es necesario el uso de maquinaria.
- Paca cilíndrica gigante: Dimensiones superiores a la paca rectangular clásica y rectangular gigante. Uso generalmente para pasto de animales.

Del campo o de almacenamientos intermedios son transportados a la planta de gasificación donde son llevados a la zona de recepción de combustible y almacenados en montones en condiciones idóneas para facilitar su secado hasta las condiciones seleccionadas en el proceso (10-15%). Los problemas derivados del almacenamiento de la paja de cereal son (Rivera Cueva, 2016):

- **Fermentación y Calentamiento:** Durante el proceso de almacenamiento, la biomasa puede experimentar fermentación parcialmente anaerobia, lo que puede elevar la temperatura interna de los montones. Este aumento de temperatura puede ser beneficioso para el secado de la biomasa, pero debe ser controlado para evitar que supere niveles que podrían provocar la degradación química de los compuestos lignocelulósicos.
- **Autocombustión:** Las condiciones anaerobias dentro de los montones pueden aumentar el riesgo de autocombustión, especialmente si los montones son demasiado grandes. Se recomienda limitar el tamaño de los montones de biomasa residual a alrededor de 40-50 m³ para mitigar este riesgo.

- **Manejo de Montones:** Es importante evitar que los montones de biomasa sean demasiado compactos, ya que esto puede dificultar el acceso del aire y la aireación adecuada. Los montones deben permitir una buena circulación de aire para llegar a la humedad deseada.
- **Materiales Finos:** La presencia de materiales finos puede obstaculizar la entrada de aire, lo que puede acelerar el calentamiento interno y aumentar el riesgo de autocombustión.
- **Medidas de Control:** Para controlar el aumento de temperatura en los montones de biomasa, se establece un volumen máximo de 50 m³ por pila, lo que también ayuda a cumplir con las regulaciones contra incendios.

Se propone utilizar sistemas de ventilación adecuados para promover el flujo de aire a través de la paja mediante ventiladores o aberturas estratégicamente ubicadas en el almacén que faciliten la circulación natural del aire por diferencias de temperatura y densidad. También es necesario llevar un control de la humedad en el lugar de almacenamiento para verificar que la biomasa mantiene las condiciones idóneas para su posterior etapa.

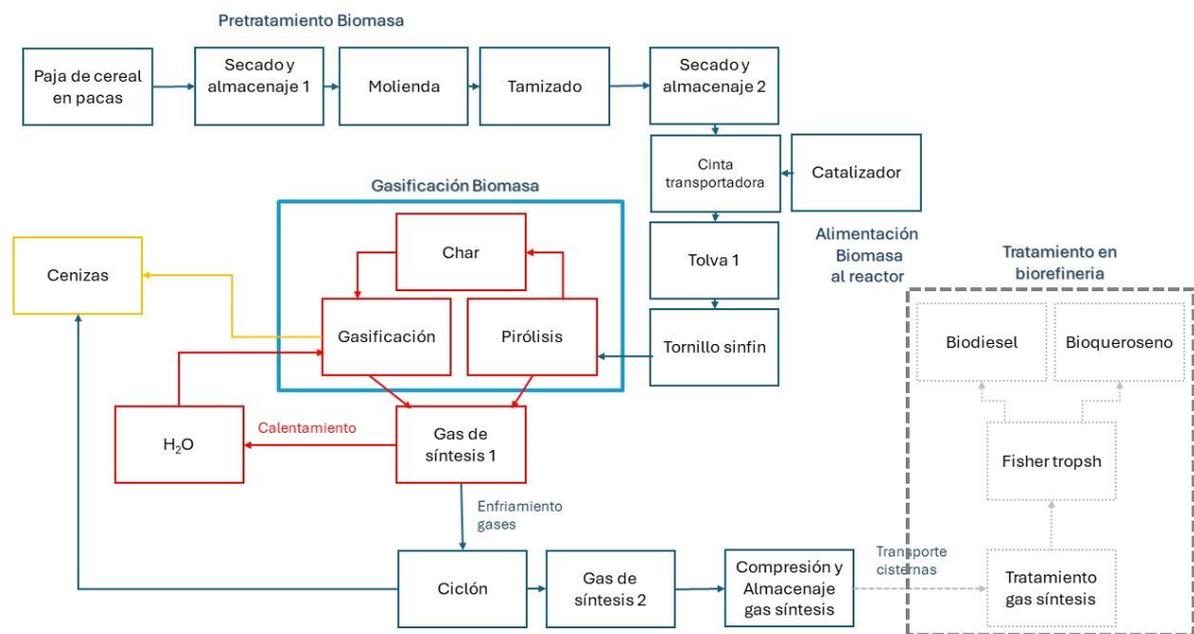
Una vez alcanzado el grado de secado deseado (alrededor del 10 %), son triturados en una astilladora para reducir su tamaño a entre 2 y 3 mm. La razón de este paso previo es la densificación de la biomasa. Se parte de una biomasa en formato astillas en balas, con una densidad máxima de 300 kg/m³. Pero para el proceso de gasificación tipo downdraft es necesaria una densidad de biomasa de al menos 500kg/m³. El material obtenido tras la molienda debe de tener esta densidad y ha de depositarse en un área de almacenamiento intermedia.

Para la alimentación al gasificador se hará primero una carga en una tolva que estará conectada a una cinta transportadora. Esta cinta garantizará así el flujo de biomasa es el adecuado para el proceso de gasificación, dependiendo del tamaño del gasificador o de la cantidad de gas de síntesis que se va a producir. La alimentación al reactor se llevará a cabo mediante una segunda tolva equipada con un tornillo sinfín para facilitar un flujo uniforme y controlado de las astillas, y evitar las aglomeraciones.

8. Diseño de la instalación

El proyecto se centra en una planta de tamaño medio diseñada para producir gas de síntesis a partir de biomasa de residuos de cereales. En este apartado se detallan las condiciones ideales del proceso de gasificación para obtener un gas de síntesis suficientemente rico en CO y H₂ para poder ser utilizado posteriormente como materia prima para la obtención de biocombustibles. A continuación, en la figura 11 se puede ver el proceso completo de la instalación, así como los posteriores procesos a realizar en la refinería.

Figura 11: Esquema de la instalación de gasificación



Fuente: Elaboración propia

8.1. Pretratamiento biomasa

Para poder alimentar la biomasa al reactor, se va a moler la biomasa hasta un tamaño no superior a 3mm (IDAE, 2007a) y alcanzar al menos una densidad de 500 kg/m³. Para ello es necesario una combinación de astillado y molienda en la trituración de materiales lignocelulósicos para reducir la cristalinidad de la celulosa, al mismo tiempo que aumentar la superficie específica y la densidad aparente del material.

Una vez molida la biomasa, se pasa por un tamiz para eliminar aquellas partículas con tamaño superior que generarían inquemados y reducirían la eficiencia de la gasificación.

8.2. Proceso de gasificación

El proceso de gasificación se lleva a cabo en un reactor continuo de lecho móvil tipo downdraft, dividido en dos etapas principales que ocurren de forma consecutiva: (Sánchez Bastardo, 2014)

- Pirólisis (750°C): La biomasa se descompone térmicamente, generando una corriente gaseosa compuesta por CO, H₂, CO₂ y CH₄, y un residuo sólido llamado char de pirólisis.
- Gasificación (850°C): El char de pirólisis se somete a una segunda etapa de gasificación con vapor de agua, produciendo una nueva corriente gaseosa rica en CO, H₂ y CO₂, junto con un residuo sólido denominado char de gasificación. Esta etapa se podría incluir la adición de catalizador en una relación de 5 kg de biomasa por 1 kg de catalizador.

Como agente gasificante para la obtención de gas de síntesis se ha seleccionado agua+aire. El agua va a tener un precalentamiento, elevando su temperatura inicial gracias al aprovechamiento del calor de los gases producidos en la gasificación. Con este paso además de calentar el agua, se consigue disminuir la temperatura de salida los gases de gasificación.

8.3. Filtrado

El gas de síntesis obtenido contiene partículas en suspensión y una fracción de CO₂ y CH₄. Para eliminar las partículas en suspensión se emplea un ciclón que retiene las partículas sólidas arrastradas por las corrientes gaseosas. Los gases obtenidos por la gasificación van a ver su temperatura reducida gracias al precalentamiento del agua del proceso y pudiendo pasar directamente al ciclón sin dañarlo.

8.4. Compresión y almacenamiento

Una vez filtrado el gas de síntesis obtenido, es necesario su almacenaje en tanques de acero inoxidable. La compresión del gas obtenido a 20 bar viene determinada por la presión a la cuál es transportado a la planta para su refino. (Lapesa, s. f.). Estos gases serán transportados posteriormente mediante camiones cisterna hasta la planta de refino.

Etapas purificación gas síntesis (refinería)

La propuesta de este trabajo es que estas etapas de purificación posteriores al filtrado para la reducción CO_2 y CH_4 , se hagan en una refinería. El incluir en el trabajo presente estas etapas encarece el mismo y lo hace poco viable. El producto final tras el refinado en una instalación específica en la refinería será un gas de síntesis purificado rico en CO e H_2 , adecuado para su uso en procesos de Fischer-Tropsch para la producción de hidrocarburos líquidos ligeros. Se puede ver que estos procesos aparecen en la figura 11 punteados en gris. En el apartado de conclusiones se añaden referencias a las posteriores etapas de purificación.

8.5. Cálculo de las instalaciones

A la hora de realizar el cálculo de las instalaciones de este proyecto, se va a seleccionar un modelo de reactor de gasificador comercial de tamaño medio que se utilizará para la obtención del gas de síntesis. El problema es que no existen multitud de reactores comerciales, ya que para la construcción y puesta en marcha de este tipo de proyectos se hace mediante estudios a medida de las instalaciones requeridas.

Se elige un reactor tipo downdraft de tamaño medio que se vende con todos los elementos de control y filtrado del gas de síntesis a través de un fabricante de instalaciones de gasificación para la producción de electricidad mediante la combustión del gas de síntesis. Se va a verificar si este modelo produce un gas de síntesis con las propiedades necesarias (sin utilizarlo para la generación de electricidad) y verificar si es viable económicamente.

8.5.1. Reactor de gasificación

El fabricante es Shandong PULITA New Energy Technology Co., Ltd. (*Planta de energía gasificadora*, 2024). En el caso de este gasificador incluye una etapa final de uso del gas de síntesis para la producción de la energía eléctrica. En el caso del presente proyecto, el gasificador a utilizar no se utilizaría con esta última etapa, almacenando el gas producido para su posterior transporte.

Otra característica del reactor es que solo utiliza aire como agente gasificante, en lugar de añadir vapor de agua durante el proceso de gasificación. Esto lo hace más económico y sencillo. Es muy similar a la instalación en uso en Andalucía y explotada por INERCO (IDAE,

2007a). El gran inconveniente es que será necesario eliminar el nitrógeno que aparece en el gas de síntesis por la presencia de aire en otro proceso adicional. Las características del modelo elegido vienen detalladas en la tabla 8:

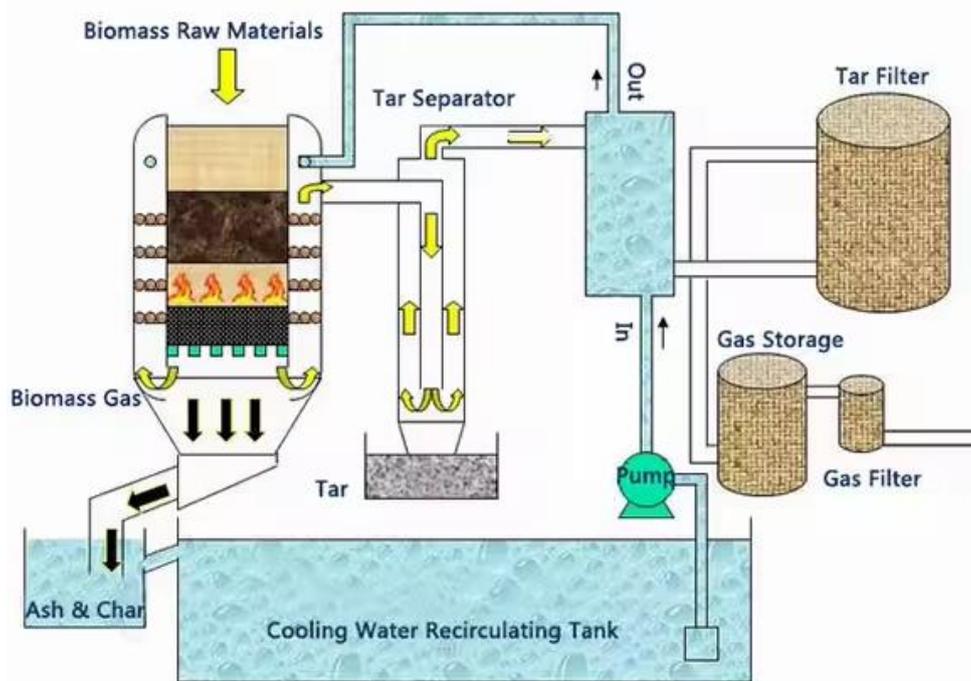
Tabla 8: Especificaciones modelo de gasificador Downdraft

Model	HBF-1200W
Type:	Downdraft type fixed bed
Gas output:	1200 m3/h
Consumption Material:	600kg /h
Gas caloric value:	4600-5200KJ/m ³
Self - consumption electricity:	40kw
Gasification efficiency:	>80%
Draught fan Power:	400V (Standard power, 50/60Hz)
Raw material:	Rice husk, woodchips, sawdust, bark, shavings, crop stalks, coconut hull, olive pomace, bagasse., plastic waste, palm tree. cotton straw
Requirement of the feedstock	particle size is ≤5 cm, moisture content ≤20 %.

Fuente (PULITA ENERGY, s. f.)

El esquema del generador que se ha seleccionado se puede ver en la figura 12:

Figura 12: Esquema de funcionamiento del gasificador



Fuente (PULITA ENERGY, s. f.):

8.5.2. Composición de la biomasa:

Como se expuso en el apartado de evaluación del recurso, la biomasa se elegida es paja de cereal que proviene de residuos agrícolas con una humedad entre 10-15% y un pretratamiento para la densificación de molienda hasta un tamaño de 2-3 mm. Según los estudios analizados, la composición de la paja de cereales se mueve en los siguientes rangos:

- Carbono (C): alrededor del 43-50%
- Hidrógeno (H): alrededor del 5-8%
- Oxígeno (O): alrededor del 39-45%
- Nitrógeno (N): alrededor del 0,35-1%
- Poder calorífico de la paja de trigo: En el rango de aproximadamente 14-16 MJ/kg

En este estudio se van a tomarse valores medios de la biomasa para poder realizar los cálculos: (Bilbao Duñabeitia, 2009):

- Carbono (C): 46%
- Hidrógeno (H): 6.5%
- Oxígeno (O): 43%
- Nitrógeno (N): 0,6 %
- Azufre (S): 0,05%
- Cenizas: 4%

Para el cálculo, se toma la cantidad de carbono, hidrógeno y oxígeno en 1 kg de biomasa:

- Cantidad de carbono (C): 0.46 kg
- Cantidad de hidrógeno (H): 0.065 kg
- Cantidad de oxígeno (O): 0.43 kg
- Cantidad de azufre (S): 0.05 kg

8.5.3. Relación agente gasificante y biomasa

En la gasificación de biomasa con aire y vapor de agua, la relación de equivalencia (RE) suele variar según las condiciones específicas de operación y el diseño del proceso. Sin embargo, hay rangos comunes que se consideran óptimos para lograr una gasificación eficiente. Estos rangos están influenciados por factores como la composición de la biomasa, la temperatura y

la presión de operación, entre otros. En general, las investigaciones en el campo de la gasificación sugieren que la RE óptima para la gasificación de biomasa con aire y vapor de agua se encuentra típicamente en el rango de 0.2 a 0.4. Dentro de este intervalo, se busca optimizar la eficiencia del proceso, maximizando la producción de gas combustible (principalmente monóxido de carbono e hidrógeno) y minimizando la formación de subproductos no deseados, como alquitranes y gases inertes. En muchos casos, se ha observado que las operaciones de gasificación eficientes suelen tener una RE cercana a 0.3. Esta configuración se considera un punto óptimo donde se maximiza la producción de gas combustible y se minimizan las pérdidas de energía en forma de calor sensible y latente. Su cálculo viene dado por las ecuaciones (Tobío-Pérez, Y. et al., 2020):

Relación estequiométrica entre gasificante y combustible

$$Re_{G/C} = 11,5 \cdot C + 34,5 \cdot \left(H - \frac{O}{8} \right) + 4,32 \cdot S$$

Sustituyendo los valores medios: 5,7 kg de aire por cada kg de biomasa

Relación real entre el gasificante y el combustible, usando RE= 0,3 :

$$Rr_{G/C} = RE \cdot Re_{A/C} = 1,7 \text{ kg de aire por kg de biomasa}$$

Flujo gasificante en función del flujo de la biomasa:

$$F_{aire} = Rr_{A/C} \cdot F_{biomasa} = 1,7 \cdot 600 \text{ kg/h} = 1020 \text{ kg/h}$$

8.5.4. Temperatura y presión del proceso

Para el reactor elegido, la presión óptima es a presión ambiente, para el proceso de pirólisis, 750°C y para gasificación 800°C. (Sánchez Bastardo, 2014). En este caso concreto el gasificador las condiciones de uso no las conocemos, pero atendemos a las condiciones de uso de este tipo de reactores, deberá estar entre 700°C y 1200°C (Tobío-Pérez, Y. et al., 2020)

8.5.5. Rendimiento del gas de síntesis

Se calcula la composición del gas de síntesis producido (CO, H₂, CO₂, CH₄, etc.) y su rendimiento en función de los parámetros de operación del proceso. El uso de aire como agente gasificante

va a condicionar el tipo de gas de síntesis obtenido, siendo de menor calidad que el obtenido con vapor de agua.

Según el tipo de biomasa utilizado y el agente gasificante, de la bibliografía se ha determinado que la composición que vamos a obtener del gas de síntesis es la que se expone en la tabla 9:

Tabla 9: Composición del gas de síntesis obtenido según la biomasa seleccionada

Agente Gasificante	Composición del gas obtenido (%)					
	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	N ₂	C ₂
Aire	16	20	12	2	50	0
Oxígeno	32	48	15	2	3	0
Vapor de Agua	50	20	22	6	0	2

Fuente:(Rivera Cueva, 2016)

Según el fabricante, usando como agente gasificador aire, obtendríamos la composición del gas de síntesis que se desglosa en la tabla 10:

Tabla 10: Composición del gas de síntesis con el modelo de gasificador seleccionado

Compuestos	% Según fabricante	% Medios	Densidad (kg/m3)	
CO	20%-22.5%	21	1,184	0,24864
H ₂	10%-12.6%	11	0,0899	0,009889
CH ₄	2%-4%	3	0,657	0,01971
CO ₂	13%	13	1,976	0,25688
O ₂	1%	1	1,429	0,01429
N ₂	46%-50%	48	1,2506	0,600288
H ₂ S	14-16,4 mg/Nm ³	3	1,36	0,0408
			densidad gas de síntesis	1,190497

Fuente (PULITA ENERGY, s. f.)

Se puede observar que los resultados del gas de síntesis que se obtendrían con este gasificador corresponden con los extraídos de la bibliografía. Los valores más altos y que necesitarán un posterior proceso de purificación corresponden al nitrógeno. Esto requeriría un proceso de purificación del gas para la eliminación de este elemento, como se expone en el capítulo de conclusiones.

8.5.6. Balance de Masa

Una vez se ha obtenido el flujo de aire necesario para la gasificación de la biomasa seleccionada, se procede al cálculo de la cantidad de gas de síntesis resultante, y poder comparar este resultado con el proporcionado por el fabricante.

Biomasa (kg/h)+ Gasificante (kg/h)= 600 kg/h + 1020 kg/h = 1620 kg/h productos finales (gas de síntesis + cenizas).

Además del gas de síntesis, se produce un producto de desecho, ceniza. Este producto puede utilizarse posteriormente como fertilizante en los propios campos de los cuales se están extrayendo los residuos de paja de cereal Los reactores como el seleccionado producen alrededor de 1-2% de cenizas. Se toma un dato medio para el cálculo (1,5%):

- Producción de gas de síntesis~ 1600 kg/h
- Producción de cenizas ~ 25 kg/h

Para obtener el flujo másico de gas de síntesis, se divide el valor de producción de gas de síntesis entre la densidad del gas obtenido.

$$F_{gas} = \frac{M_{gas} \left(\frac{kg}{h}\right)}{\rho_{gas} \left(\frac{kg}{m^3}\right)} = 1600/1,19 \sim 1345 \text{ m}^3/h$$

que es la cantidad similar de las especificaciones del fabricante de la instalación de gasificación.

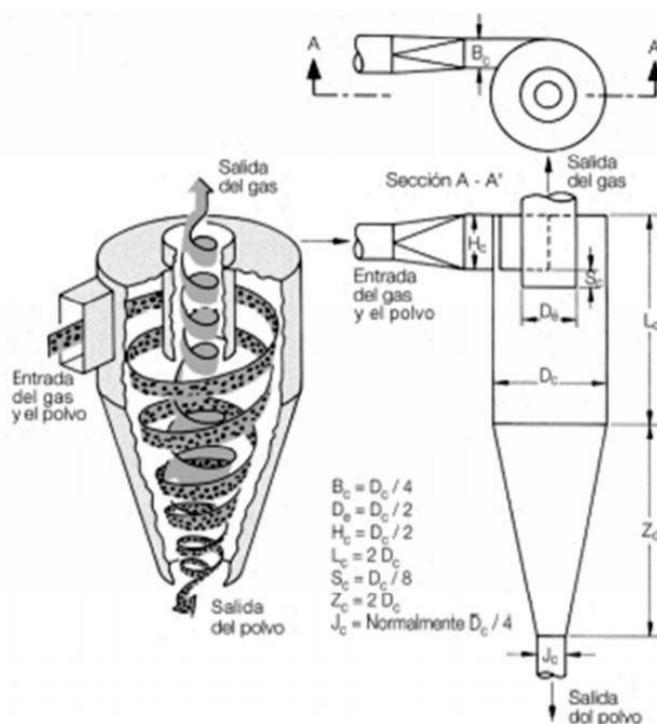
8.5.7. Limpieza del gas de síntesis obtenido

El ciclón tiene la capacidad para eliminar partículas suspendidas en corrientes gaseosas con eficiencia y fiabilidad. Su principio de funcionamiento es la aplicación de la fuerza centrífuga y la gravedad. Al ingresar el gas de al ciclón, lo hace tangencialmente a una velocidad alta. Esta entrada tangencial genera un flujo helicoidal dentro del cuerpo del ciclón, creando una fuerza centrífuga que impulsa las partículas hacia las paredes del dispositivo. Por ello las partículas más pesadas, debido a su inercia, tienden a ser dirigidas hacia las paredes del ciclón, mientras que el gas limpio continúa su curso hacia la salida. Conforme las partículas impactan contra

las paredes del ciclón, descienden hacia la base del dispositivo. Allí, un colector o tolva las recoge, permitiendo que el gas purificado continúe su trayectoria sin la carga de partículas no deseadas. (Sánchez Bastardo, 2014)

Se trata de un dispositivo simple y eficaz a la hora de eliminar partículas en suspensión. Al prescindir de la necesidad de un filtro de aire adicional, el dispositivo minimiza tanto los costos iniciales como los de mantenimiento asociados. Además, al prevenir obstrucciones y acumulaciones de partículas, contribuye a mitigar posibles problemas operativos posteriores, así como la presencia de partículas en suspensión en la instalación.

Figura 13: Esquema del ciclón para la eliminación de partículas en suspensión.



Fuente: (ILIE IONUT, 2019)

La eficiencia del ciclón depende del tamaño de partícula presente en el gas de síntesis. Para procesos de gasificación, los tamaños de partículas que se obtienen son entorno a los $2,5\mu\text{m}$ (Sánchez Bastardo, 2014). De la elección del ciclón dependerá el rendimiento obtenido a la hora de eliminar las partículas del gas de síntesis obtenido. La elección será tal que pueda gestionar la salida de gas, $1345\text{m}^3/\text{h}$ y realizar el filtrado de forma eficaz.

8.5.8. Eficiencia energética del proceso

Se calcula la eficiencia energética del proceso de gasificación, sin considerar la energía requerida para el pretratamiento de la biomasa, la energía de calentamiento y la energía necesaria para el mantenimiento del reactor.

Esta eficiencia vendrá dada por la siguiente ecuación (Tobío-Pérez, Y. et al., 2020):

$$\eta_g = \frac{V_{gas} \cdot PCI_{gas}}{F_{biomasa} \cdot PCI_{biomasa}}$$

Para este cálculo se va a utilizar el valor de PCI del gas de síntesis proporcionado por el fabricante: 4600-5200KJ/m³, que coincide en rangos con los proporcionados por la bibliografía. El valor para utilizar en este cálculo será de 5MJ/m³.

En cuanto a PCI de la biomasa, se va a utilizar el valor obtenido de la paja de cereal del IDAE, al 10% de humedad: 3630 kcal/kg, 15,18MJ/m³. Se obtiene un valor similar al que nos aporta el fabricante:

$$\eta_g = \frac{1600 \cdot 5}{600 \cdot 15,18} = 87,6\%$$

8.5.9. Cálculo del almacenamiento del gas de síntesis obtenido

El almacenaje del gas de síntesis requiere condiciones similares al gas natural. Los depósitos de almacenaje deben tener las mismas cualidades que para el almacenaje de productos procedentes del petróleo, al ser su composición muy similar.

La producción diaria de gas de síntesis sería de 1345 m³/h. Suponiendo que la planta opera 8h al día, la producción diaria serían 10.760 m³/día, o 12.800 kg/día.

Para su almacenaje es necesario comprimir el gas de síntesis obtenido. Con ello podremos reducir su volumen. Se va a seleccionar un compresor que sea capaz de comprimir 1345 m³/h de gas de síntesis hasta una presión de 20 bar. La elección de esta presión es debido a que es la presión de almacenaje de GLP según la Directiva Europea 2014/68/UE. Para la producción diaria, será necesario:

Según la ley de Boyle-Mariotte,

$$P_1 \cdot V_1 = P_2 \cdot V_2$$

$$V_2 = 10.760 / 20 = 538 \text{ m}^3/\text{día}$$

Las cisternas de transporte son de 52 m³ de capacidad, por lo que serían necesarias al menos 10 cisternas al día para el traslado del gas de síntesis producido. (Lapesa, s. f.).

8.5.10. Cálculo del almacenamiento de la biomasa

Una vez evaluado tanto el gasificador comercial en los apartados anteriores, se va a calcular el espacio necesario para el almacenamiento de la biomasa según los parámetros proporcionados por el fabricante.

8.5.10.1. Almacenamiento recepción material

La recepción de la biomasa se realizará en alpacas grandes para su mayor aprovechamiento:

- 90 x 100 x 210 cm ~ 1,90 m³
- peso: 200 – 300 kg

Debido a las restricciones para evitar incendios y facilitar la manipulación y la eliminación de humedad, los montones de paja no pueden tener más de 50m³. Esto significa unas 26 balas por montón. Si los apilamos con bases de 4, podemos llegar a una altura de 6 niveles, para un total de 24 alpacas por montón

Cada montón ocupa una superficie de $4 \times 0,90 \times 2,10 = 7,56\text{m}^2$

La altura mínima para almacenamiento es de $6 \times 1 = 6 \text{ m}$

Si cada una de las balas pesa 250kg aproximadamente, necesitamos por día unas 20 unidades de paja de cereal. Podemos ajustar los montones de paja en esta unidad y saber cuántos días tenemos de reserva sin necesidad de hacer inventario.

El almacenamiento por día de alimentación del reactor necesitaría superficie de:

Superficie de $4 \times 0,90 \times 2,10 = 7,56\text{m}^2$

Altura mínima para almacenamiento es de $5 \times 1 = 5 \text{ m}$

El almacenamiento mínimo vendrá determinado por el tiempo que se tardaría en obtener la humedad máxima admisible en el reactor (menor al 20%). Esto estaría condicionado por la composición real de la paja de cereal y la zona en la cual fuera extraída. En cada zona geográfica estará condicionada por la climatología. Si no quisiéramos depender de estos factores podríamos optar por un secado forzado y un control de humedad, pero esto encarecería más la instalación.

8.5.10.2. Almacenamiento intermedio

El almacenamiento calculado en el apartado es para la biomasa antes de ser densificada. Una vez se ha producido la molienda del material, la densidad aparente del mismo debe de alcanzar al menos los 500kg/m³.

Si se supone una actividad de la planta de 8h diarias, el consumo diario de biomasa con el uso del reactor de 600 kg/h x 8h = 4800 kg / día.

Si la densidad mínima a la cual debe de ser molido el material es de 500kg/m³, el almacenaje diario será de 9,6 m³/día. El cálculo final del almacenaje intermedio dependerá de los días que se estime de stock.

9. Análisis económico

Para estudiar la viabilidad del proyecto, es esencial realizar un análisis económico del mismo.

En este análisis se van a considerar:

- Estimaciones de costes e ingresos.
- Factores de riesgo: Variabilidad en el precio de los residuos y del gas de síntesis.
- Subvenciones y ayudas: Posibilidad de obtener financiamiento o incentivos gubernamentales.

Se van a enumerar los costes del proceso por cada una de las fases, y a continuación se va a realizar un cálculo estimado de los costes del proceso.

9.1. Análisis por etapas del proceso

1. Almacenamiento Previo de las Pacas: Permite un acceso constante a biomasa y evita interrupciones en el suministro:

Costos:

- Infraestructura: Construcción de almacenes.
- Equipos: Tractores, carretillas elevadoras, etc.
- Mantenimiento y Operación: Personal y mantenimiento de equipos.
 - Sueldo anual (2 operarios)
 - Mantenimiento anual

2. Molienda de la Biomasa: Permite la reducción de tamaño: Con ello mejora la eficiencia en el proceso de gasificación.

Costos:

- Equipos: Trituradoras y molinos.
- Energía: Consumo eléctrico de los equipos.
- Mantenimiento: Repuestos y mano de obra.

3. Almacenamiento de la Biomasa Triturada: Permite la disponibilidad de biomasa procesada para mantener la continuidad de la gasificación.

Costos:

- Infraestructura: Silos o almacenes para biomasa triturada.
- Seguridad: Sistemas contra incendios y control de plagas.

- Mantenimiento anual

4. Planta de Gasificación: Producción de gas de síntesis

Costos

- Infraestructura: Construcción de la planta:
 - Materiales construcción
 - Sistemas eléctricos
 - Instalación de fontanería.
- Equipos: Reactores de gasificación, sistemas de control.
- Servicios:
 - Energía: Consumo durante el proceso de gasificación anual
 - Mantenimiento: Repuestos y mano de obra.
 - Operación: Personal cualificado. Sueldo anual de 2 operarios

5. Ciclón para Limpiar el Gas de Síntesis: Es para la obtención de un gas de síntesis limpio y con ello mejorar la calidad producto final.

Costos:

- Equipos: Ciclón, filtros y sistemas de limpieza.
- Energía: Consumo durante el proceso de limpieza.
- Mantenimiento: Repuestos y mano de obra.

● **Compresión y Almacenamiento del Gas de Síntesis:** Es necesario un almacenamiento seguro y comprimido para permitir el posterior transporte del gas obtenido.

Costos:

- Equipos: Compresor y tanques de almacenamiento.
- Energía: Consumo de los compresores.
- Mantenimiento: Repuestos y mano de obra.

● **Gestión de las Cenizas**

Costos:

- Equipos: Sistemas de recolección y transporte.
- Mantenimiento anual

- Operación: Personal y equipos. 1 operario
- Sueldo anual (1 operario)
- **Disposición final de los subproductos:** Posibilidad de utilizar las cenizas en construcción o agricultura como fertilizante.

Costos de transporte a lugares de disposición o reciclaje.

9.2. Análisis Financiero

Para poder verificar la viabilidad de la planta se van a tener en cuenta los ingresos que ésta pueda generar, los gastos durante la fase de operación, comparando los mismos con la inversión a realizar. A continuación, se van a enumerar cada uno de los apartados

Ingresos:

- Venta de gas de síntesis: Principal fuente de ingresos
- Subproductos: venta de cenizas como fertilizante para agricultura

Gastos Operativos:

- Mantenimiento: Regular de todos los equipos e infraestructura.
- Personal: Sueldos y capacitación.
- Energía: Consumo de electricidad y otros combustibles.
- Otros: Seguros, licencias, imprevistos.

Inversión Inicial:

- Costos de capital: Construcción de infraestructura, compra de equipos.
- Permisos y estudios: Estudios de viabilidad, impacto ambiental, permisos de construcción.

Indicadores financieros

Para la evaluación de un proyecto de esta naturaleza, se suelen utilizar los siguientes indicadores

- Periodo de Retorno de la Inversión (PRI): Tiempo necesario para recuperar la inversión inicial.
- Valor Actual Neto (VAN): Diferencia entre el valor presente de ingresos y costos futuros.
- Tasa Interna de Retorno (TIR): Tasa de descuento que hace que el VAN sea cero.

Para el cálculo detallado del análisis financiero se tiene que considerar los siguientes aspectos:

- Variabilidad en el precio de los residuos y del gas de síntesis.
- Subvenciones y ayudas: Posibilidad de obtener financiamiento o incentivos gubernamentales. Este punto no se aborda en este trabajo ya que depende del momento de realización del proyecto.

9.3. Estimación de los indicadores económicos con la instalación comercial seleccionada

Se realizan los cálculos con el gasificador comercial seleccionado para poder estimar tanto la producción de gas de síntesis como la viabilidad de una posible planta con instalaciones similares. De la misma manera, se van a hacer una estimación del coste y la viabilidad de la planta con este gasificador y determinados supuestos que se irán detallando a continuación, entre los cuales se elige el peor escenario en cada uno de los casos:

Supuesto inversión inicial

Costo de la planta de gasificación: 750.000 a 1.000.000 € (*PULITA ENERGY*, s. f.)

Supuestos de producción y uso de la planta:

Producción de gas de síntesis: 1600 kg/h, según cálculo

Producción de cenizas: 25 kg/h, según cálculo

Horas de operación por día: 8 horas

Días de operación por año: 300 días (asumiendo algunas paradas por mantenimiento)

Costos Adicionales: según aparatos en el mercado actual

Depósitos necesarios para almacenamiento: se toman valores estimados

Almacén de pacas: 5.0000 a 100.000 €

Almacén de biomasa triturada: de 30.000 a 50.000 €

Ciclón para limpieza del gas de síntesis: 50.000 a 100.000 €

Aparato de molienda: desde 50.000 a 150.000 €

Total costos adicionales:

$100.000 \text{ €} + 50.000 \text{ €} + 100.000 \text{ €} + 150.000 \text{ €} = 400.000 \text{ €}$

Costo total de instalación: Sumando el coste de la instalación y los costos adicionales

$1.000.000 \text{ €} + 400.000 \text{ €} = 1.400.000 \text{ €}$

Producción Anual:

Según los cálculos de los apartados anteriores se puede calcular la producción tanto de gas de síntesis como de cenizas anuales

Producción de gas de síntesis diaria: $1600\text{kg/h} \times 8\text{h/día} = 12.800\text{kg/día}$

Producción de gas de síntesis anual: $12.800\text{kg/día} \times 300\text{días/año} = 3.840.000\text{kg/año}$

Producción de cenizas diaria: $25\text{ kg/h} \times 8\text{ h/día} = 200\text{ kg/día}$

Producción de cenizas anual: $200\text{ kg/día} \times 300\text{ días/año} = 60.000\text{ kg/año}$

Costos Operativos Anuales:

Se van a suponer tanto los operarios necesarios para operar la planta, según las indicaciones del fabricante, así como la energía necesaria para la producción de gas y el coste por el mantenimiento de equipos.

Personal: 2 operarios a 25,000 €/año cada uno: 50.000 €/año

Energía: Estimado 50 €/MWh, consumo anual estimado en 800 MWh

$50\text{€/MWh} \times 800\text{ MWh} = 40.000\text{€/año}$

Mantenimiento de equipos: 10% del costo total de la planta (incluidos los adicionales)

$10\% \times 1.400.000\text{€} = 140.000\text{€/año}$

Costos varios estimados (seguros, seguridad, imprevistos): 10.000€/año

Total costos operativos anuales: Es el resultado de la suma de los costes de personal, energía, mantenimiento y otros

$50.000\text{€} + 40.000\text{€} + 140.000\text{€} + 10.000\text{€} = 240.000\text{€/año}$

En cuanto al coste de la biomasa, no se va a considerar su coste ya que el fin del presente trabajo es la revalorización a través de la gasificación y obtención de gas de síntesis.

Ingresos Anuales: Se estima el precio de venta del gas de síntesis a partir del precio de venta de gas natural.

Para el gas natural 1m^3 equivale a 10.4 kWh.

Precio de venta (*Mercado ibérico del gas, 2024*)

$31,61\text{ €/MWh} = 0,03161\text{ €/kWh}$

$0,03161\text{ €/kWh} \times 10,4\text{ kWh/m}^3 = 0,329\text{ €/m}^3$

Para el paso a €/kg, se hace a través de la densidad del gas obtenido en el apartado 8.5.5, tabla 10: $1,19\text{kg}/\text{m}^3 = 0,276 \text{ €/kg}$.

Como hay fluctuaciones en el mercado, se estima un precio inferior del 70% con respecto al precio en mayo de 2024: 0,15 €/kg

Ingresos por Venta de Gas de Síntesis: Precio estimado del gas de síntesis: 0,15 €/kg

Ingresos anuales por gas de síntesis: $3.840.000\text{kg} \times 0,15\text{€/kg} = 576.000\text{€/año}$

Para estimar el precio de venta de las cenizas, se toma el precio de venta de cenizas para cemento (Centro de estudios y experimentación de Obras públicas & Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, s. f.)

$46,66 \text{ €/Tn} = 0,047\text{€/kg}$.

Asumiendo un dato conservador en la estimación de la venta, se toma 0,02 €/kg como precio de venta de cenizas.

Ingresos por Venta de Cenizas: Precio estimado de las cenizas: 0,2 €/kg

Ingresos anuales por cenizas: $60.000\text{kg} \times 0,02\text{€/kg} = 1.200\text{€/año}$

Total ingresos anuales: Sumando los ingresos anuales por la venta de gas de síntesis, el ingreso por venta anual de cenizas obtenemos:

$576.000\text{€} + 1.200\text{€} = 577.200\text{€/año}$

9.3.1. Cálculo de los indicadores Económicos

En este apartado se va a estimar el beneficio anual neto, restando de los ingresos anuales los costos de la planta. Con ello se va a calcular el retorno de la inversión, para ver si es rentable. Además, se va a utilizar un software para la estimación del VAN para verificar si el proyecto es viable.

A continuación se resumen los datos obtenidos hasta el momento:

Costo de instalación de la planta: 1.400.000 €

Costos Operativos Anuales: 240.000 €

Ingresos Anuales: 577.200 €

Beneficio Anual Neto: Ingresos anuales - Costos operativos anuales

$577.200\text{€} - 240.000\text{€} = 337.200\text{€/año}$

Periodo de Retorno de la Inversión (PRI): Inversión inicial/Beneficio neto anual

1.400,000 € /337.200 €/año ≈4.15 años

Valor Actual Neto (VAN):

Para el cálculo se utiliza la herramienta online *Calcuvio*, (*Calcuvio*, s. f.). Si se supone una tasa de descuento del 10% y un horizonte de 10 años, se obtiene un valor de 671.948,03 €.

VAN positivo indica la viabilidad del proyecto.

Tasa Interna de Retorno (TIR):

La TIR es la tasa que hace que el VAN sea cero. Con un beneficio neto anual de 337.200 €, la TIR sería mayor que la tasa de descuento asumida del 10%, indicando una buena rentabilidad del proyecto. Utilizando la misma herramienta online que en el caso anterior, el TIR es de aproximadamente el 20%.

9.4. Conclusiones de la evaluación económica

Con una inversión inicial de 1.400.000 €, la planta de gasificación de residuos de cereales presenta un periodo de retorno de la inversión de aproximadamente 4.15 años. Los ingresos anuales superan los costos operativos, proporcionando un beneficio neto anual considerable. Este análisis sugiere que la implantación de la planta puede ser económicamente viable y rentable bajo las condiciones y supuestos considerados, los cuales han sido muy conservadores.

10. Análisis medioambiental

El punto de partida del trabajo ha sido el encontrar una solución a las emisiones de gases de efecto invernadero derivado del uso actual de combustibles fósiles en el transporte de turistas. Como solución se ha planteado la posibilidad de utilizar biocombustibles, y para la fabricación de estos se ha propuesto el fabricar gas de síntesis como materia prima de los mismos a través de un proceso de gasificación de paja de cereal. Pero esta solución no está exenta de impactos. Se van a estudiar los impactos tanto positivos como negativos de la solución propuesta.

10.1. Impactos positivos por el uso de la biomasa y biocombustibles

Se van a evaluar aquellos impactos derivados de la instalación de la planta de gasificación que resulten beneficiosos en aspectos sociales, medioambientales y económicos.

10.1.1. Ventajas del uso de la biomasa procedente de residuos agrícolas

La reutilización de los residuos lignocelulósicos procedentes de industrias agrícolas y forestales contribuyen a los siguientes aspectos dentro de la sociedad:

- **Economía circular:** La reutilización de los residuos, con la síntesis del gas de síntesis para la fabricación de biocombustibles y el uso de las cenizas como fertilizante contribuyen a la disminución de los residuos de biomasa y la su revalorización de estos
- **Evitar emisiones no controladas por quemas de residuos en el campo:** Se trata de una práctica habitual, quemar aquellos residuos de biomasa para su eliminación. Con ello se pierde el potencial energético que contiene la biomasa, además de poder desencadenar incendios no deseados
- **Mejora economía en las zonas rurales:** Al no desechar los residuos y poder obtener una valoración de estos, aumenta la capacidad económica de las zonas rurales. Además de obtener un rédito económico de la venta del gas de síntesis a las refinerías.

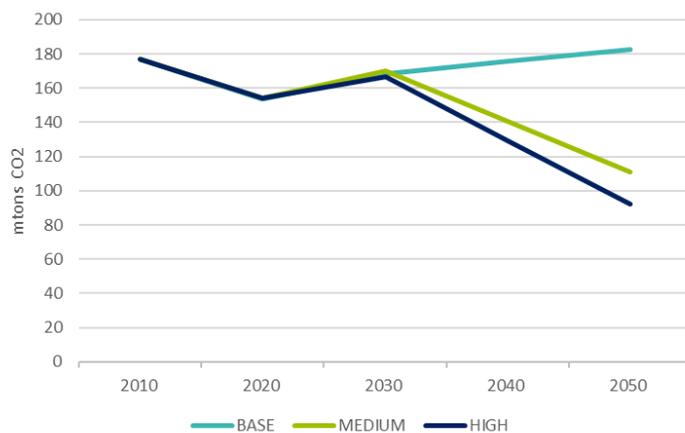
10.1.2. Evitar emisiones generadas por combustibles fósiles

Dentro de la estrategia de movilidad con la vista puesta en la neutralidad climática en 2050, los biocombustibles son una estrategia necesaria y muy importante. El Real Decreto 376/2022 ha implementado la acreditación de la verificación de la sostenibilidad y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero para biocarburantes, biolíquidos y biogás, con el fin de cumplir los objetivos de venta y consumo en el sector del transporte. Establece objetivos obligatorios para biocarburantes, promoviendo su uso en el transporte. En el ámbito aeronáutico, la estrategia de Sostenibilidad de Aena se ha fijado el objetivo de alcanzar un 4,6% de biocombustibles distribuidos en su red para el año 2030. Esto demuestra el compromiso del sector aéreo con la reducción de emisiones y la promoción de prácticas más sostenibles en el transporte aéreo. (Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, 2023). Esta estrategia está coordinada con el hecho de que no es posible la electrificación de los aviones a corto y medio plazo, por lo que su única vía de reducción de emisiones con el horizonte puesto en 2050 es a través del uso de biocombustibles.

Con el uso de biocombustibles en el transporte y en concreto en el transporte generado por los movimientos del turismo, contribuye a disminuir los gases de efecto invernadero como se puede apreciar en las figuras 12 y 13:

Figura 13: Evolución de las emisiones de CO₂ de transporte aviación

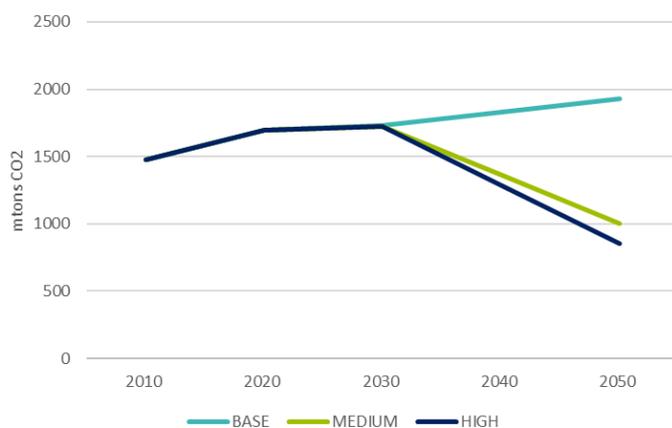
CO₂ emissions for inland navigation (in mton CO₂): In the MEDIUM and HIGH scenario the CO₂ emissions decreases



Fuente : (Paul Baker, et al., 2017)

Figura 14 : Evolución de las emisiones de CO₂ en aviación

CO₂ emissions for aviation (in mtons CO₂): After 2030 in the Medium and High scenarios the CO₂ emissions decreases significantly



Fuente : (Paul Baker, et al., 2017)

10.2. Impactos negativos de la planta de gasificación

Se van a evaluar los impactos generados por la implantación de la gasificadora, desde su construcción, durante la fase de operación y posterior desmantelamiento. Además, estos se van a evaluar según su nivel de peligrosidad y de si son reversibles o no.

Serán acciones reversibles aquellas que su impacto permite volver a la situación inicial natural, e irreversibles aquellas que no pueda volverse a su situación natural inicial.

Con ello, se van a proponer para cada uno de los impactos, las posibles acciones correctivas. Para la elaboración de este apartado, se ha consultado el trabajo de (Sánchez Bastardo, 2014).

10.2.1. Construcción

La fase de construcción de una instalación industrial conlleva un impacto en el medio ambiente debido a la construcción de los edificios de la planta, así como los servicios necesarios para su operación.

10.2.1.1. Suelo: fauna y flora

La construcción de la planta puede causar la destrucción del hábitat natural, afectando tanto a la fauna como a la flora local. La eliminación de vegetación y la alteración del suelo pueden llevar a la pérdida de biodiversidad y a la perturbación de ecosistemas locales.

Impacto: Alta peligrosidad. La destrucción de hábitats naturales puede causar la pérdida de especies y biodiversidad. Se tratan de acciones parcialmente reversibles, debido a que la reforestación y restauración de hábitats pueden mitigar algunos daños, pero la recuperación completa puede llevar años o no ser posible para algunas especies.

Medidas correctivas: Programas de reforestación una vez acabada la obra civil y creación de áreas de conservación durante la ejecución de esta.

10.2.1.2. Partículas en suspensión: atmósfera

Durante la fase de construcción, se generan partículas en suspensión debido a las actividades de excavación, movimiento de tierra y transporte de materiales. Estas partículas pueden afectar la calidad del aire local y representar riesgos para la salud respiratoria de los trabajadores y la comunidad cercana.

Impactos: Media peligrosidad. Las partículas en suspensión afectan la calidad del aire y la salud respiratoria. Se tratan de impactos reversibles ya que la calidad del aire mejora rápidamente una vez que cesan las actividades que generan las partículas en suspensión.

Medidas correctivas: Mantener vías de acceso limpias y húmedas para evitar la generación de las partículas.

10.2.1.3. Ruidos: fauna

Las actividades de construcción generan ruido, pudiendo afectar negativamente a la fauna local, alterando sus patrones de comportamiento, desplazándolos de sus hábitats y provocando estrés en las especies sensibles al ruido.

Impacto: Media peligrosidad. El ruido puede causar estrés y alterar el comportamiento de la fauna. Y son reversibles ya que a fauna puede regresar una vez que cesa el ruido.

Medidas correctivas: Limitar horas de trabajo. Usar maquinaria con reducción de ruido y el uso de barreras acústicas si hay zonas con posibles anidaciones cercanas.

10.2.1.4. Generación de residuos industriales

La construcción de la planta genera una cantidad significativa de residuos industriales, incluyendo materiales de construcción no utilizados, escombros y residuos peligrosos. La gestión adecuada de estos residuos es esencial para minimizar su impacto ambiental.

Impacto: Alta peligrosidad. Los residuos industriales pueden ser caracterizados como peligrosos y contaminantes. Pero se trata de un impacto reversible con una gestión adecuada de los residuos.

Acciones correctivas: Plan de gestión de residuos y reciclaje.

10.2.1.5. Vertidos: Aguas subterráneas

Existe el riesgo de que durante la construcción se produzcan vertidos accidentales de sustancias químicas o combustibles que pueden contaminar las aguas subterráneas.

Impacto: Alta peligrosidad. Contaminación de aguas subterráneas puede afectar fuentes de agua potable. Se trataría de una acción no reversible. La descontaminación de aguas subterráneas es compleja y es posible que no se pueda realizar completamente ya que puede haber zonas no accesibles

Acciones correctivas: Debido a la posible irreversibilidad de este impacto, las acciones correctivas son esenciales: Sistemas de contención y monitoreo constante de la calidad del agua.

10.2.2. Fase de Operación

Durante la fase de operación de la planta de gasificación, además de la producción de gas de síntesis y cenizas, se producen impactos negativos en el medio ambiente. Estos se van a evaluar a continuación.

10.2.2.1. Partículas en suspensión: biomasa polvo, cenizas: Atmósfera

Durante la operación, la manipulación y procesamiento de la biomasa pueden generar polvo, contribuyendo a la presencia de partículas en suspensión en la atmósfera. Estas partículas pueden afectar la calidad del aire y representar riesgos para la salud. Igualmente, la manipulación de las cenizas resultantes del proceso de gasificación pueden afectar a la calidad del aire de la planta y con ello a sus trabajadores.

Impacto: Al igual que en la fase de construcción, puede ser catalogado de media peligrosidad al afectar la calidad del aire y la salud de los trabajadores. Pero se trata de acciones reversibles: mejora la calidad del aire una vez que cesan las emisiones.

Acciones correctivas: Sistemas de filtración y captación de polvo, monitoreo de la calidad del aire en habitáculos cerrados. Uso de mascarillas con el nivel de filtración adecuado al tipo de emisiones.

10.2.2.2. Emisiones por el gas de síntesis: atmósfera

El proceso de gasificación de biomasa produce gas de síntesis y las emisiones de este gas pueden incluir contaminantes como monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrógeno (NOx) y otros, impactando la calidad del aire y contribuyendo al efecto invernadero.

Impacto: Alta peligrosidad. Emisiones de CO, CO₂, y NOx impactan la calidad del aire y contribuyen al efecto invernadero. Además, son parcialmente reversibles. La reducción de emisiones puede mejorar la calidad del aire, pero la emisión de CO₂, una vez realizada, no puede ser mitigada.

Acciones correctivas: Sistemas de tratamiento de gases a la salida del gasificador y monitoreo continuo a la salida del gasificador para la detección de posibles fugas.

10.2.2.3. Gestión de subproductos

Además de las emisiones atmosféricas, la gasificación de biomasa produce subproductos como alquitranes y cenizas que deben ser gestionados adecuadamente para evitar la contaminación del suelo y del agua.

Impacto: Alta peligrosidad debido a que los subproductos como alquitranes y cenizas pueden contaminar el suelo y agua. Pueden ser acciones reversibles con una gestión adecuada de estos residuos.

Acciones correctivas: Sistemas de recolección y tratamiento de subproductos, procedimientos para su disposición de forma segura y controlada.

10.2.2.4. Consumo de agua

Durante la operación de la planta de gasificación de biomasa se pueden requerir grandes cantidades de agua para procesos de enfriamiento y limpieza.

Impacto: Media peligrosidad. En caso de utilizar grandes cantidades de agua pueden afectar los recursos locales. Igualmente se trata de acciones reversibles con la implantación de medidas correctivas.

Acciones correctivas: Sistemas de recirculación y reutilización de agua. Monitorización del uso de agua diario.

10.2.2.5. Ruido: fauna

El funcionamiento continuo de la planta genera ruido, que puede afectar a la fauna local, causando desplazamiento y alteración en sus hábitos naturales.

Impacto: Media peligrosidad. El ruido puede afectar la fauna local. Y se trata de acciones reversibles ya que la fauna puede adaptarse o regresar una vez que cesa el ruido.

Acciones correctivas: Barreras acústicas y monitoreo de niveles de ruido.

10.2.3. Fase de Desmantelamiento

En la última fase de la planta de gasificación, debido al desmantelamiento se pueden producir impactos medioambientales, los cuales se evalúan a continuación.

10.2.3.1. Generación de residuos industriales

El desmantelamiento de la planta genera una cantidad significativa de residuos industriales, incluyendo materiales de construcción, equipos y residuos peligrosos.

Impacto: Alta peligrosidad al ser los residuos industriales contaminantes. Son acciones reversibles con una gestión adecuada de los residuos.

Acciones correctivas: Plan de gestión de residuos, reciclaje, disposición adecuada de residuos peligrosos.

10.2.3.2. Rehabilitación del emplazamiento

Después del desmantelamiento de la planta, es necesario rehabilitar el emplazamiento para devolverlo a su estado original. Esto puede incluir la replantación de vegetación y la restauración de hábitats naturales.

Impacto: Alta peligrosidad si no se gestiona adecuadamente. Por ello son parcialmente reversibles estas acciones ya que la replantación y restauración pueden recuperar parte del ecosistema original.

Acciones correctivas: Replantación de vegetación, restauración de hábitats naturales.

En la tabla 11 se detallan y amplían los impactos de cada uno de los aspectos estudiados en cada fase del proyecto, junto con su nivel de impacto y las medidas correctoras propuestas:

Tabla 11: Impactos ambientales planta gasificación

FASE	IMPACTO	NIVEL	DESCRIPCIÓN	MEDIDA
CONSTRUCCIÓN	SUELO: FLORA	ALTO	Pérdida de plantas y árboles, reducción de biodiversidad. División de áreas de vegetación, limitando la dispersión de especies	Establecer un plan de reforestación de los árboles que se hayan visto afectados por la construcción. Crear corredores verdes para evitar la segmentación
	SUELO: FAUNA	ALTO	Pérdida de refugio, alimentación y reproducción . Reducción de la biodiversidad animal.	Perimetrar un área de conservación de la fauna que se evite el paso durante la construcción. Diseñar el proyecto para reducir la fragmentación, establecer corredores ecológicos.
	PARTÍCULAS EN SUSPENSIÓN	MEDIO	La inhalación de partículas finas puede causar problemas respiratorios y cardiovasculares en los trabajadores	Utilización de rociadores de agua y productos supresores de polvo en áreas de trabajo y caminos. Instalar barreras físicas y coberturas en áreas de trabajo para contener el polvo
	RUIDOS: FAUNA	MEDIO	Estrés y alteración de los patrones de comportamiento de la fauna, incluyendo desplazamiento y problemas en la reproducción	Limitar el horario de construcción, utilizar maquinaria con reducción de ruido, instalar barreras acústicas
	RESIDUOS INDUSTRIALES: FAUNA	ALTO	Pueden causar daños físicos a la fauna	Gestión adecuada de residuos, evitar acumulación de basura en el sitio, programas de reciclaje.
	VERTIDO AGUAS: FAUNA	ALTO	Vertidos de sustancias químicas pueden envenenar a la fauna y alterar los hábitats acuáticos.	Sistemas de contención de derrames, uso de materiales no contaminantes, monitoreo constante.
	VERTIDO AGUAS: FLORA	ALTO	Afecta el crecimiento y salud de las plantas debido a químicos.	Sistemas de contención de derrames, monitoreo constante de la calidad del agua en los acuíferos

OPERACION	PARTÍCULAS EN SUSPENSIÓN	MEDIO	Inhalación de partículas finas por los trabajadores	Uso de mascarillas. Utilizar sistemas de rociadores de agua y productos supresores de polvo en áreas de manipulación de biomasa. Instalar sistemas de filtración de aire zona combustión. Monitoreo de la calidad del aire.
	EMISIONES ATMÓSFERA GAS DE SÍNTESIS	ALTO	Emisión de contaminantes (CO, CO2, NOx). Inhalación por parte de los trabajadores.	Implementar sistemas de monitoreo continuo y sensores de gases. Instalar sistemas de ventilación. Monitorización de la calidad del aire
	EMISIONES DE SUBPRODUCTOS	ALTO	Emisión de cenizas	Sistema de recolección de cenizas. Instalación de sistemas de filtrado a la salida del gasificador.
	CONSUMO DE AGUA	MEDIO	Consumo agua durante la operación de la planta. Posibles descargas de aguas residuales y efluentes contaminados	Instalación de sistemas de recirculación y reutilización de agua. Monitorización del consumo del agua. Monitorización de la calidad del agua
	RUIDOS: FAUNA	MEDIO	Ruidos derivados de la operación de la maquinaria, puede interferir con los comportamientos animales, causando estrés.	Instalar barreras acústicas alrededor de las fuentes de ruido. Implementar sistemas de monitoreo continuo del ruido. Plantar árboles y vegetación densa alrededor de la planta para actuar como barreras naturales contra el ruido
DESMANTELAMIENTO	RESIDUOS INDUSTRIALES	ALTO	Producción de residuos industriales, como materiales de construcción, maquinaria y residuos peligrosos	Clasificar y manejar adecuadamente los residuos. Establecer un plan de reciclaje de los componentes sensibles de la planta
	REHABILITACIÓN EMPLAZAMIENTO	ALTO	Desmantelamiento de estructuras y eliminación de infraestructura existente	Implementar un plan de rehabilitación del emplazamiento para restaurar el área a su estado original. Plan de replantación de vegetación como original, seleccionando especies autóctonas de la zona

Fuente: Elaboración propia

11. Resultados

Una vez realizado el análisis de los parámetros de la biomasa necesarios para ser utilizada en el proceso de gasificación, el cálculo de los datos de producción de gas de síntesis y sus características y la estimación de los parámetros financieros se va a evaluar si los resultados obtenidos cumplen los objetivos que se propusieron al inicio del estudio.

11.1. Relación de los resultados con los objetivos propuestos

- Se ha verificado que la biomasa está disponible en todo el territorio peninsular español, al haber elegido como combustible residuo de cereales.
- Se ha comprobado que las condiciones fisicoquímicas obtenidas de la paja de cereal cumplen con las requeridas para ser gasificado, aunque se encuentran en el límite inferior.
- Entre el proceso de gasificación propuesto y el que finalmente se ha utilizado para los cálculos no coincide en el agente de gasificador utilizado. En condiciones de funcionamiento ideales para la obtención de gas de síntesis ideal para ser utilizado como materia prima en el proceso de Fischer-Tropsch para la obtención de biocombustibles, se debería de utilizar vapor de agua y no aire.
- Debido a esto, va a ser necesario un proceso adicional de eliminación del nitrógeno presente en el gas de síntesis, llamado reformado de gas (se detalla más adelante en el apartado de mejoras del proceso). Igual que el procesado del gas de síntesis para la producción de biocombustibles a través del proceso de Fischer-Tropsch se propone realizarlo en la refinería, este paso previo de refino también se propone que sea realizado allí.
- La cantidad de gas de síntesis obtenida necesita de un transporte a la planta de refino diario mediante cisternas a presión. Es posible que la cantidad producida de gas de síntesis supere la cantidad viable a ser transportada. Por ello, se propone:
 - Usar parte del gas de síntesis obtenido diariamente para la obtención de calor o electricidad mediante la combustión de este en motores de combustión.
- Tras analizar económicamente la planta de gasificación se ha obtenido periodo de retorno de la inversión de 4.15 años. La implantación de la planta puede ser

económicamente viable y rentable bajo las condiciones y supuestos considerados. Si se hiciera un cálculo más ajustado, no tan conservador, es muy probable que el análisis económico obtenido fuera considerablemente mejor.

- El análisis medioambiental realizado revela que no existen impactos irreversibles, y que los impactos negativos obtenidos son fácilmente subsanables y evitables con medidas sencillas. Y los impactos positivos derivados de la utilización de los biocombustibles obtenidos posteriormente del gas de síntesis son necesarios para la neutralidad climática en 2050.

11.2. Ventajas del modelo propuesto

Debido a que se trata de una producción de gas de síntesis a pequeña escala y utilizando residuos agrícolas, se consigue la revalorización de estos y su aprovechamiento energético a través de un producto. La realización del proceso de producción de gas de síntesis, sin el posterior refinado, hace que sea rentable la instalación a pequeña escala.

Este proceso produce combustibles líquidos limpios, con bajo contenido de azufre y menos emisiones contaminantes, además de otros productos como ceras y lubricantes. Con ello se favorece la reducción de emisiones de carbono, mejorando la seguridad energética y permitiendo el aprovechamiento de residuos, todo ello compatible con la infraestructura existente para combustibles líquidos actuales.

12. Conclusiones

El problema con el cual se encuentra actualmente el turismo mundial, y en concreto en España, es seguir siendo fuente de riqueza, pero de forma sostenible. Para lograr ser sostenible a medio plazo es imprescindible el uso de biocombustibles.

La obtención de biocombustibles para la movilidad de turistas (biodiesel para autobuses y bioqueroseno para aviones), puede lograrse a partir de gas de síntesis a través del proceso de Fisher-Tropsch. El proceso de gasificación es un método rentable para producir gas de síntesis, a partir de residuos agrícolas lignocelulósicos.

En el caso concreto de la península ibérica, se ha evaluado la biomasa disponible y se ha seleccionado como combustible para el proceso de gasificación paja de cereal. Esta biomasa cumple con las condiciones de composición, humedad y poder calorífico para la utilización en el proceso de gasificación mediante un reactor downdraft. Además, se ha verificado que está disponible en toda la península, siendo posible la instalación de la planta gasificadora en múltiples localizaciones de la geografía española.

La instalación de gasificación propuesta se ha seleccionado para poder cumplir con las propiedades del gas de síntesis válido para el proceso de Fisher-Tropsch. Se han evaluado todos los elementos y fases del proceso, proponiendo unas condiciones de funcionamiento ideales.

A la hora de hacer el cálculo de la instalación, se ha optado por comprobar si un gasificador comercial cumplía con las condiciones tanto de producción como de rendimiento para hacer la instalación viable y atractiva. En este punto se ha visto las limitaciones del gasificador seleccionado ya que el gas obtenido necesitaría un proceso de refinado adicional.

Al evaluar la cantidad de gas de síntesis obtenido es posible que sea más elevada de la que pueda ser transportada de forma diaria o semanal a la planta de refinado. Por lo que una de las propuestas de mejoras es usar el excedente para la obtención de calor o electricidad a través de un motor de combustión.

El análisis económico se ha realizado primero de forma teórica y después se ha hecho un cálculo más ajustado con la instalación seleccionada. Tomando valores muy conservadores para los precios de venta tanto del gas de síntesis como de las cenizas, y suponiendo unos

precios en el rango superior de cada una de las instalaciones propuestas, la instalación sería económicamente viable y amortizable en un periodo de menos de 5 años. Así mismo, la evaluación medioambiental no detecta impactos negativos que no puedan ser subsanados con planes de acción viables.

Para conocer si realmente es viable la propuesta global, se tendría que ampliar el trabajo y hacer una comparativa entre:

- Varias instalaciones de gasificación de tamaño medio tipo downdraft con biomasa lignocelulósica como paja de cereal para la producción de gas de síntesis para su posterior refinado y transformación en biocombustible en una sola planta.
 - Ventajas:
 - Materia prima estaría cerca de la planta de gasificación. Pretratamiento y almacenamiento en la planta de gasificación
 - Producción a pequeña escala de gas de síntesis con el enriquecimiento atomizado con reactores de gasificación de sencillo manejo.
 - Instalación de refinado con procesos de limpieza y acondicionamiento del gas de síntesis controlados para la posterior transformación en biocombustibles mediante Fischer-Tropsch
- Una sola instalación de gasificación de gran tamaño en la cual llevar a cabo todo el proceso: Transporte de la biomasa - Pretratamiento - almacenamiento biomasa-gasificación-limpieza gas- almacenamiento gas de síntesis - proceso de Fischer-Tropsch

12.1. Contribuciones de la propuesta

La propuesta de instalación impactaría en diversos aspectos, tanto económicos, sociales y medioambientales, tales como:

- Cambio modelo productivo español, introduciendo industria en zonas rurales con unas propuestas rentables como es la gasificación de desechos agrícolas.
- Repartir riqueza del turismo a las zonas rurales, haciéndoles pieza clave en la movilidad sostenible del mismo. Atomizar la riqueza de una actividad tan localizada en las zonas donde ésta no llega.

- Cumplir normativa europea y llegar a la neutralidad climática en 2050 mediante el uso de biocombustibles.
- Evitar el abandono de los cultivos, potenciando el poder extraer un valor añadido del cultivo agrícola revalorizando los residuos lignocelulósicos.
- Contribuir a la economía circular, reutilizando desechos que se convierten en productos valor económico.
- Obtener una independencia energética a largo plazo del transporte, al no tener que depender de los hidrocarburos de importación.
- Lograr una potencial la especialización de los puestos de trabajo en zonas fuera de los centros urbanos.
- Evitar el desguace de vehículos de transporte, que son útiles, simplemente cambiando el combustible utilizado.
- Aprovechar la infraestructura de distribución de los combustibles fósiles, tanto de aviación como de terrestre.

12.2. Mejoras en el proceso de gasificación

- Utilizar un gasificador que utilice vapor de agua en su proceso, mejorando sustancialmente la calidad del gas de síntesis obtenido, en concreto evitar la presencia de nitrógeno en el gas obtenido.
- Elegir un gasificador con menor producción diaria para poder almacenar la producción en tanques cisterna del tamaño adecuado.
- Utilizar como catalizador compuesto de níquel, para mejorar la conversión y disminuir la cantidad de nitrógeno en el gas de síntesis
- Verificar que el precio de venta del gas de síntesis a la planta de refino.

12.3. Procesos de refino posteriores

Una vez obtenido el gas de síntesis en las instalaciones de gasificación, éste sería transportado a una instalación de fabricación de biocombustibles. En esta planta tendrían lugar tanto los

procesos de refinado como los procesos de transformación del gas de síntesis refinado a biocombustibles.

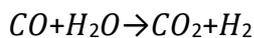
Los procesos posteriores que serían necesarios para obtener estos biocombustibles serían:

12.3.1. Reformado gas

El gas de síntesis obtenido con el modelo de gasificador elegido, es un gas de síntesis rico en nitrógeno. Para eliminar el nitrógeno del gas de síntesis, se emplea el proceso de purificación conocido como "Reforma del Gas de Agua con Ajuste de Aire" (Water Gas Shift, WGS, en inglés). Este proceso convierte parte del CO en el gas de síntesis en CO₂, lo que ayuda a eliminar impurezas como el nitrógeno.(Nuevo, 2024).

El proceso de WGS se lleva a cabo mediante la reacción entre CO y vapor de agua (H₂O) en presencia de un catalizador. La reacción generalmente se lleva a cabo a altas temperaturas, típicamente entre 350°C y 450°C, y a presiones moderadas.

La ecuación química de la reacción de reforma de agua con ajuste de aire es:



Esta reacción ayuda a desplazar el equilibrio hacia la formación de más CO₂ y H₂, lo que conduce a una reducción en la concentración de CO y, por lo tanto, ayuda a purificar el gas de síntesis al eliminar el nitrógeno antes del Fisher tropsch.

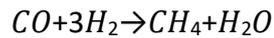
Si en lugar de utilizar como agente gasificante aire, se utilizara vapor de agua, este proceso no sería necesario.

12.3.2. Proceso Fisher- Tropsch

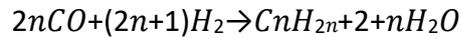
Es un método de síntesis de hidrocarburos a partir de gas de síntesis. Este proceso implica una serie de reacciones químicas complejas que se llevan a cabo en presencia de un catalizador. (Wikipedia, s. f.)

Las ecuaciones que describen el proceso de Fisher-Tropsch varían según la complejidad del reactor utilizado. Sin embargo, a grandes rasgos, las reacciones típicas incluyen la formación de hidrocarburos más pesados a partir de CO y H₂. Estas reacciones pueden representarse de manera simplificada como:

Formación de metano:



Formación de hidrocarburos pesados (parafinas, olefinas y naftenos):



12.4. Limitaciones del estudio actual

En el estudio actual no se ha caracterizado una muestra real de paja de cereal, por lo que los datos obtenidos en este estudio son teóricos. Si se quisiera implantar este tipo de instalación en una zona agraria concreta, se deberá analizar la biomasa disponible en la zona.

De la misma manera, se ha elegido paja de cereal por su disponibilidad en toda la península, pero esta propuesta sería válida para cualquier desecho de tipo lignocelulósico, como restos de podas o desbroces. La elección de la biomasa va a depender de la posible disponibilidad de esta en la zona de instalación de la planta, sin comprometer otros usos que pudieran dársele a la biomasa.

En cuanto al gas de síntesis obtenido, se han hecho suposiciones que deberían de ser comprobadas según el tipo real de biomasa utilizado, y el agente gasificante usado. Una mejora sencilla y no demasiado cara sería la sustitución del agente gasificante de aire por vapor de aire.

Se ha supuesto que el gas de síntesis se refinaría en una planta de refino y tratamiento para su posterior obtención de biocombustibles a través de Fischer-Tropsch. Se tendrían que hacer el estudio de si esta instalación receptora de gas de síntesis de varios productores en distintos lugares de la península es viable.

Otra limitación es el transporte del gas de síntesis obtenido, ya que va a depender de la distancia a la planta de refino. Esta distancia y la frecuencia de recogida del gas de síntesis va a ser clave a la hora de hacer la valoración total del proceso de fabricación de biocombustibles.

En conclusión, se tendría que verificar si es viable un sistema distribuido de producción de gas de síntesis, añadiendo a la producción de este el transporte a la planta de refino. Y comparar este coste con el de la construcción de una planta de gasificación industrial que haría el proceso completo.

Referencias bibliográficas

- Antolín Giraldo, G., Irusta Mata, R., Martín Gil, J., & Rey Martínez, F. J. (1989). Caracterización de combustibles lignocelulósicos mediante análisis térmico. Caracterización de la paja de cereal. *Era Solar*, 6.
- APPA, & Deloitte. (2022). *Estudio del Impacto Macroeconómico de las Energías Renovables en España. 4 Biocombustibles* (p. 10).
- Bilbao Duñabeitia, R. (2009, julio 7). *Aprovechamiento termoquímico de la Biomasa*. Curso Fronteras de la Energía, Benasque.
- CaixaBank research. (2024, enero 22). [Caixabank reseach]. ¿Cómo evolucionará el turismo internacional en España en 2024? Sensibilidad a partir de factores macroeconómicos. <https://www.caixabankresearch.com/es/analisis-sectorial/turismo/como-evolucionara-turismo-internacional-espana-2024-sensibilidad-partir>
- Calcuvio. (s. f.). Accedido 21 de mayo de 2024, de <https://www.calcuvio.com/van-tir>
- Carraro, C., Searle, S., & Baldino, C. (2021). *Waste and residue availability for advanced biofuel production in the European Union and the United Kingdom*. 9.
- Centro de estudios y experimentación de Obras públicas, & Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. (s. f.). *Catálogo de residuos utilizables en construcción*. <https://www.cedexmateriales.es/catalogo-de-residuos/24/diciembre-2011/37/aspectos-economicos.html>
- CONFEBUS. (2019, mayo 31). EL AUTOBÚS EN ESPAÑA: DATOS Y RETOS. <https://www.confibus.org/publicaciones/ver/2463/el-autobus-en-espana-datos-y->

[retos#:~:text=El%20total%20de%20veh%C3%ADculos%20existentes%20en%20el%20pa%C3%ADs%20asciende%20a%2044.000.](#)

Consejo de la UE y del Consejo Europeo. (2024). [Consejo de la UE y del Consejo Europeo].

<https://www.consilium.europa.eu/en/infographics/fit-for-55-afir-alternative-fuels-infrastructure-regulation/>

Consejo de la UE y del Consejo Europeo. (2024, marzo 21). *Pacto Verde Europeo*.

<https://www.consilium.europa.eu/es/policies/green-deal/>

Exceltur. (2024). Exceltur. <https://www.exceltur.org/pib-turistico-espanol/>

Hamelinck, C., Knotter, L., Mulder, L., & Bunse, M. (2021). *The Role of Biodiesel in EU Climate*

Action. <https://ebb-eu.org/news/the-role-of-biodiesel-in-eu-climate-action-2/>

IDAE. (2007a). *Biomasa: Gasificación* (p. 36).

IDAE. (2007b). *Energía en la biomasa* (p. 92).

ILIE IONUT, C. (2019). *Diseño del proceso de gasificación para los combustibles sólidos recuperados procedentes de una planta de tratamiento mecánico biológico*.

INE. (2023, diciembre 22). *Cuenta satélite del turismo en España 2022*.

https://www.ine.es/dyngs/INEbase/es/operacion.htm?c=Estadistica_C&cid=1254736169169&menu=ultiDatos&idp=1254735576581

INE. (2024a). *Encuesta de Turismo de Residentes (ETR/FAMILITUR)* (p. 6) [Turismo]. Instituto nacional de estadística. <https://ine.es/dyngs/Prensa/ETR4T23.htm>

INE. (2024b). *Estadística de Movimientos Turísticos en Fronteras (FRONTUR)* [Turismo].

Instituto nacional de estadística. <https://www.ine.es/dyngs/Prensa/FRONTUR1223.htm>

Lapesa. (s. f.). Accedido 1 de mayo de 2024, de <https://lapesa.es/>

Mercado ibérico del gas. (2024, mayo). <https://www.mibgas.es/es/market-results>

MINECOTUR. (2024, febrero 2). *La llegada de turistas internacionales a España en 2023*

supera las previsiones y alcanza por primera vez los 85 millones [Nota de prensa].

[https://www.mintur.gob.es/es-es/GabinetePrensa/NotasPrensa/2024/Paginas/datos-](https://www.mintur.gob.es/es-es/GabinetePrensa/NotasPrensa/2024/Paginas/datos-llegada-turistas-gasto-2023-record.aspx#:~:text=lectura%3A%20%20minutos-)

[llegada-turistas-gasto-2023-record.aspx#:~:text=lectura%3A%20%20minutos-](https://www.mintur.gob.es/es-es/GabinetePrensa/NotasPrensa/2024/Paginas/datos-llegada-turistas-gasto-2023-record.aspx#:~:text=lectura%3A%20%20minutos-)

[La%20llegada%20de%20turistas%20internacionales%20a%20Espa%C3%B1a%20en%2](https://www.mintur.gob.es/es-es/GabinetePrensa/NotasPrensa/2024/Paginas/datos-llegada-turistas-gasto-2023-record.aspx#:~:text=lectura%3A%20%20minutos-)

[02023%20supera,primera%20vez%20los%2085%20millones&text=El%20gasto%20tur](https://www.mintur.gob.es/es-es/GabinetePrensa/NotasPrensa/2024/Paginas/datos-llegada-turistas-gasto-2023-record.aspx#:~:text=lectura%3A%20%20minutos-)

[%C3%ADstico%20el%20a%C3%B1o,a%20108.662%20millones%20de%20euros.](https://www.mintur.gob.es/es-es/GabinetePrensa/NotasPrensa/2024/Paginas/datos-llegada-turistas-gasto-2023-record.aspx#:~:text=lectura%3A%20%20minutos-)

Ministerio de Industria, Energía y Turismo. (2015). *Estrategia para el impulso del vehículo con energías alternativas.*

Ministerio de la Presidencia. (2023, agosto 8). *La moncloa.* la Moncloa.

[https://www.lamoncloa.gob.es/serviciosdeprensa/notasprensa/transportes/Paginas/2](https://www.lamoncloa.gob.es/serviciosdeprensa/notasprensa/transportes/Paginas/2023/080823-enaire-vuelos-julio-record.aspx)

[023/080823-enaire-vuelos-julio-record.aspx](https://www.lamoncloa.gob.es/serviciosdeprensa/notasprensa/transportes/Paginas/2023/080823-enaire-vuelos-julio-record.aspx)

Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. (2023). *Monográfico de la descarbonización en el transporte* (Observatorio del transporte y logística de España, p. 83).

Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. (2024). *Observatorio del Transporte y la Logística en España.* Observatorio del Transporte y la Logística en España.

<https://otle.transportes.gob.es/>

Ministerio para la transición ecológica y reto demográfico. (2023a). *Informe de Proyecciones de Emisiones a la Atmósfera: Edición 2023* (Edición 2023; p. 70).

Ministerio para la transición ecológica y reto demográfico. (2023b). *Régimen de comercio de derechos de emisión de la unión europea Aplicación a los operadores aéreos atribuidos a España respecto a las emisiones del año 2022.*

Naciones Unidas. (2015, septiembre 25). *Agenda 2030.*

<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2015/09/la-asamblea-general-adopta-la-agenda-2030-para-el-desarrollo-sostenible/>

National geographic, E. (2022, diciembre 22). *El coste ambiental de la aviación.* National Geographic España. https://www.nationalgeographic.com.es/medio-ambiente/el-coste-ambiental-de-la-aviacion_19260

Nuevo, D. (2024, marzo 13). *El reformado con vapor.* <https://eshidrogeno.com/reformado/>

Paul Baker, Olivier Chartier, Robert Haffner, Laura Heidecke, Karel van Hussen, Lars Meindert, Barbara Pia Oberč, Karolina Ryszka, Pantelis Capros, Alessia De Vita, Magda Walker, Peter Witzke, Hans Verkerk, Alexander Moiseyev, Marcus Lindner, Dominik Rutz, Johannes Michel, Rainer Janssen, Ilze Dzene, ... Kostas Fragkiadakis. (2017). *Research and Innovation perspective of the mid—And long-term Potential for Advanced Biofuels in Europe* (p. 156). European Commission; ISBN 978-92-79-70565-6.

PULITA ENERGY. (s. f.). Accedido 11 de mayo de 2024, de <https://www.pulitaenergy.com/biomass-power-plant/>

Rivera Cueva, H. (2016, julio). *Estudio de viabilidad técnica y económica de una planta de gasificación de biomasa para obtener gas de síntesis.* <https://buleria.unileon.es/handle/10612/5610>

Sánchez Bastardo, N. (2014, julio). *Obtención de gas de síntesis a partir de Biomasa utilizando catalizadores de Níquel*. <http://uvadoc.uva.es/handle/10324/13135>

Subsecretaría de Agricultura, Pesca y Alimentación, Subdirección General de Análisis, Coordinación y, & Estadística. (2023). *Una visión global de la agricultura española a través del análisis del censo agrario 2020* (Informe análisis 2023; p. 103). https://www.mapa.gob.es/es/ministerio/servicios/analisis-y-prospectiva/informemapa_ca2020_tcm30-653742.pdf

Suero Martín, I. (2021, junio). *Diseño y Simulación de una Planta de Producción de Metanol a partir de Biomasa*. <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/47277>

The International Renewable Energy Agency. (2016). *BOOSTING BIOFUELS Sustainable Paths to Greater Energy Security* (p. 36). <https://www.irena.org/Publications/2016/Apr/Boosting-Biofuels-Sustainable-Paths-to-Greater-Energy-Security>

Tobío-Pérez, Y., Díaz-Domínguez, Peil, D., & Denfeld, R. Piloto-Rodríguez, S. Pohl. (2020, febrero 11). *Simulación del proceso de gasificación de biomasas a partir de *Jatropha curcas* y *Dichrostachys cinerea**. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7763096>

Torben Skøtt/BioPress, Jørgen Hinge/Instituto, Tecnológico Danés y Louise, Krogh Johnson/Food & Bio, & Cluster Dinamarca. (2011). *Paja para su uso como energía*. Food & Bio Cluster Dinamarca Agro Food Park 13 8200 Aarhus N Dinamarca. https://agrobioheat.eu/wp-content/uploads/2021/02/Straw-to-Energy_AgroBioHeat_Spanish_web.pdf

US department of energy. (2020). *Sustainable Aviation Fuel Review of Technical Pathways* (p.

81). US department of energy. energy.gov/eere/bioenergy

Wikipedia. (s. f.). Proceso Fischer-Tropsch. Accedido 1 de marzo de 2024, de

https://es.wikipedia.org/wiki/Proceso_Fischer-Tropsch