



MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Análisis tecno-económico de dos rutas PtL para
producción de combustible de aviación sostenible
SAF: MtJ vs FT

Autor: Carlos Benavente Llamas

Director: Rafael Cossent Arín

Directora: Mar Oliva Pastor

Madrid

Junio de 2026

Declaración de originalidad

Declaro bajo mi responsabilidad que el Proyecto presentado con el título **Análisis tecno-económico de dos rutas PtL para producción de combustible de aviación sostenible SAF: MtJ vs FT** e la ETS de Ingeniería – ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el curso académico 2025/2026 es de mi autoría y no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada de otros documentos está debidamente referenciada.

Uso de Inteligencia Artificial¹

Declaro bajo mi responsabilidad que (indicar la opción correcta):

- ☐ No he utilizado Inteligencia Artificial en la elaboración del presente documento.
- ☒ He utilizado Inteligencia Artificial en la elaboración del presente documento y/o del Anexo B siempre en las condiciones permitidas por la Universidad Pontificia Comillas, es decir, aplicando el Nivel 2 de la [Escala de Evaluación de Perkins et al. \(2024\)](#): “La IA puede utilizarse para actividades previas a la tarea, como la lluvia de ideas, la descripción y la investigación inicial. Este nivel se centra en el uso de la IA para la planificación, las síntesis y la generación de ideas, pero las evaluaciones deben hacer hincapié en la capacidad de desarrollar y refinar estas ideas de forma independiente”. En concreto, la Inteligencia Artificial ha sido empleada para:

Se ha utilizado la inteligencia artificial para lluvia de ideas
Se ha utilizado la inteligencia artificial para la planificación de las ideas
Se ha utilizado la inteligencia artificial para la síntesis de contenido
Se ha utilizado la inteligencia artificial para la búsqueda de información
Se ha utilizado la inteligencia artificial para mejora de la redacción y ayuda en la traducción



Firmado (alumno): Carlos Benavente Llamas

Fecha: 30-junio-2026

¹ Esta declaración se refiere al uso de la Inteligencia Artificial generativa para realizar los documentos del Proyecto (Anexo B y Memoria). No aplica a Proyectos donde, por su naturaleza, deban emplear inteligencia artificial como parte de los mismos (aplicación de técnicas de aprendizaje automático, redes neuronales, análisis de datos...)

Autorización para la entrega del Proyecto

El Director del Proyecto	El co-Director del Proyecto (si aplica)
	
Fdo: Rafael Cossent Arín	Fdo: Mar Oliva Pastor
Fecha: 01-Julio-2026	Fecha: 01-Julio-2026



MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Análisis tecno-económico de dos rutas PtL para
producción de combustible de aviación sostenible
SAF: MtJ vs FT

Autor: Carlos Benavente Llamas

Director: Rafael Cossent Arín

Directora: Mar Oliva Pastor

Madrid

Junio de 2026

Agradecimientos

A Rafael y Mar por orientarme durante todos estos meses de trabajo. Vuestra dedicación y conocimiento han sido fundamentales para enriquecer el análisis y para afrontar el trabajo desde un mayor rigor técnico. Gracias por enseñarme el mundo tan interesante que son los SAF, que probablemente no hubiera conocido si no es por este proyecto.

A mis padres, mis hermanas y Paula, por aguantarme en estos meses y poner cordura en algunos momentos en los que me he visto sobrepasado al intentar compaginar trabajo y el resto de mi vida. Un trocito de este esfuerzo es suyo, al ser la voz que he necesitado en esos momentos para sentarme y centrar todo lo que tenía que hacer.

Por último, a mis amigos de Startup Juan. Empezamos hace 7 años una aventura en ICAI, que nos ha hecho darnos cuenta que ya no somos compañeros de clase, si no amigos. Viajes, risas, estrés con los exámenes, cafés en la cafetería, el banco del Froiz... un millón de momentos juntos que terminan al acabar esta etapa como alumnos. Gracias por hacer de esta experiencia universitaria la mejor posible.

ANÁLISIS TECNO-ECONÓMICO DE DOS RUTAS PTL PARA PRODUCCIÓN DE COMBUSTIBLE DE AVIACIÓN SOSTENIBLE SAF: MTJ VS FT

Autor: Benavente Llamas, Carlos.

Directores: Cossent Arín, Rafael. Oliva Pastor, Mar.

RESUMEN DEL PROYECTO

Palabras clave: SAF, e-SAF, Power-to-Liquid, Fischer-Tropsch, Methanol-to-Jet, hidrógeno renovable, CO₂ capturado, eficiencia LCoSAF, ReFuelEU Aviation, descarbonización.

Introducción

La descarbonización del transporte aéreo constituye uno de los retos más complejos dentro de la transición energética. A diferencia de otros sectores del transporte, la aviación presenta importantes limitaciones para la electrificación directa, especialmente en vuelos de media y larga distancia. En este contexto, los combustibles sostenibles de aviación, conocidos como Sustainable Aviation Fuels o SAF, se presentan como una de las alternativas más realistas para reducir las emisiones del sector en el corto y medio plazo, al poder emplearse de forma progresiva en la flota y en la infraestructura existente.

El presente Trabajo Fin de Máster tiene como objetivo realizar un análisis tecno-económico comparativo de dos rutas de producción de SAF sintético basadas en el uso de hidrógeno renovable y carbono capturado: la ruta Fischer-Tropsch y la ruta Methanol-to-Jet. Ambas rutas permiten producir hidrocarburos líquidos compatibles con el uso aeronáutico, pero presentan diferencias relevantes en términos de arquitectura de proceso, eficiencia de conversión, madurez tecnológica, situación regulatoria, costes de inversión y coste final del combustible producido.

Marco regulatorio

Para contextualizar el análisis, el trabajo revisa en primer lugar el marco regulatorio aplicable al desarrollo de los SAF. Se estudian los principales mecanismos internacionales y europeos, incluyendo CORSIA, las normas ASTM aplicables a combustibles de aviación y el Reglamento *ReFuelEU Aviation*. Este marco resulta fundamental, ya que la viabilidad de los SAF no depende únicamente de su desempeño técnico, sino también de su certificación, de

los criterios de sostenibilidad exigidos y de los mandatos regulatorios que impulsan su demanda.

Estado de la cuestión de las vías de producción SAF y e-SAF

Posteriormente, se analizan las principales vías de producción de SAF, diferenciando entre rutas biogénicas y rutas sintéticas o e-SAF. Dentro de estas últimas, el trabajo se centra en la comparación entre Fischer-Tropsch y Methanol-to-Jet. La ruta Fischer-Tropsch se caracteriza por una mayor madurez industrial y regulatoria, así como por una experiencia tecnológica más consolidada. Sin embargo, presenta una distribución amplia de productos, por lo que no todo el carbono convertido se destina directamente a la fracción SAF. Por su parte, la ruta Methanol-to-Jet utiliza el metanol como intermedio químico y presenta un mayor potencial de selectividad hacia hidrocarburos en el rango del queroseno, aunque cuenta con menor madurez comercial y una situación regulatoria en evolución.

Desarrollo del modelo económico

La segunda parte del trabajo desarrolla un modelo económico en Excel con el objetivo de comparar ambas rutas bajo hipótesis homogéneas. El alcance del modelo se limita a la etapa de síntesis y conversión del combustible, considerando el hidrógeno renovable y el CO₂ capturado como materias primas adquiridas externamente. Por tanto, no se modelizan de forma explícita ni la electrólisis ni la captura de carbono, lo que permite centrar la comparación en las diferencias propias de cada ruta de conversión. El modelo calcula la producción anual de SAF, los consumos de materias primas, el CAPEX, el OPEX, el precio de venta requerido, el coste nivelado de producción de SAF, la TIR del accionista, el DSCR y realiza distintos análisis de sensibilidad.

Análisis de resultados

Los resultados principales del análisis se muestran en la siguiente tabla:

	MTJ	FT-PtL
Producción SAF (t)	77.626	68.493
TIR equity (%)	12,0%	12,0%
Payback (year)	12	12
Precio venta SAF (€)	5.588	6.253
LCoSAF (euros/Kg SAF)	6,83	7,70
Feedstock costs (€m)	(358,37)	(355,71)
H2 efectivo (tH2/tSAF)	0,59	0,67
CO2 efectivo (tCO2/ tSAF)	4,16	4,39
CAPEX (€m)	395,3	345,9
DSCR	1,6x	1,6x

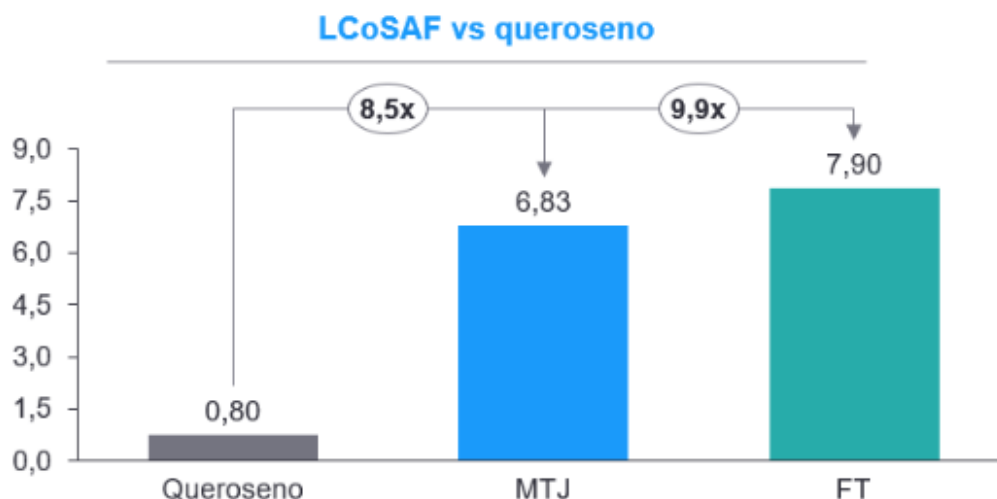
Principales resultados obtenidos en el análisis.

Los resultados obtenidos muestran que, dentro del caso base analizado, la ruta Methanol-to-Jet presenta una posición económica más favorable que la ruta Fischer-Tropsch. Aunque MtJ requiere una inversión inicial superior, se compensa con una mayor producción anual de SAF. En el modelo, MtJ alcanza alrededor de 77.625 toneladas anuales de SAF, frente a unas 68.493 toneladas en la ruta FT. Esta mayor producción permite repartir los costes fijos entre un volumen superior de combustible final y contribuye a reducir el coste unitario de producción.

El principal indicador económico de comparación es el LCoSAF, o coste nivelado de producción de SAF. En el caso base, la ruta MtJ obtiene un LCoSAF de 6,83 €/kg, mientras que la ruta FT alcanza 7,70 €/kg. Esta diferencia no se debe a un menor CAPEX, sino a una mayor eficiencia efectiva hacia la fracción SAF y a un mejor aprovechamiento de las materias primas dentro del perímetro definido en el modelo. El análisis de sensibilidad muestra, además, que el precio del hidrógeno renovable es una de las variables más determinantes para la competitividad de ambas rutas, dado que representa una parte fundamental de los costes operativos.

Conclusiones

A pesar de estos resultados, el trabajo concluye que ninguna de las dos rutas es actualmente competitiva frente al queroseno fósil sin apoyo regulatorio, reducción de costes tecnológicos o incentivos específicos.



Costes nivelados de ambas rutas vs queroseno fósil..

La ruta FT presenta la ventaja de una mayor madurez tecnológica y menor riesgo regulatorio, lo que puede facilitar su despliegue en fases iniciales. La ruta MtJ, por el contrario, aparece como una alternativa con mayor potencial económico en el caso base, pero su desarrollo futuro dependerá de la consolidación de su certificación, de su escalado industrial y de la reducción de incertidumbres tecnológicas y financieras.

En definitiva, el trabajo pone de manifiesto que el desarrollo de los e-SAF no depende de una única variable, sino de la combinación entre tecnología, regulación, disponibilidad de hidrógeno renovable, acceso a CO₂ compatible, financiación e integración industrial. La comparación entre FT y MtJ muestra que la elección de una ruta no debe basarse únicamente en el coste unitario estimado, sino también en el equilibrio entre eficiencia, madurez, riesgo regulatorio y capacidad de escalado. Por ello, los combustibles SAF sintéticos pueden desempeñar un papel relevante en la descarbonización de la aviación, siempre que su desarrollo esté acompañado por un marco regulatorio estable, una reducción progresiva del coste del hidrógeno renovable y una estrategia industrial capaz de movilizar inversión a gran escala.

TECHNO-ECONOMIC ANALYSIS OF TWO PTL PATHWAYS FOR THE PRODUCTION OF SUSTAINABLE AVIATION FUEL (SAF): MTJ VS. FT

Author: Benavente Llamas, Carlos.

Directors: Cossent Arín, Rafael. Oliva Pastor, Mar.

ABSTRACT

Keywords: SAF, e-SAF, Power-to-Liquid, Fischer-Tropsch, Methanol-to-Jet, renewable hydrogen, captured CO₂, LCoSAF efficiency, ReFuelEU Aviation, decarbonization.

Introduction

Decarbonizing the aviation sector is one of the most complex challenges of the energy transition. Unlike other transport sectors, aviation faces significant limitations to direct electrification, particularly for medium-and long-haul flights. In this context, Sustainable Aviation Fuels (SAF) have emerged as one of the most realistic alternatives for reducing emissions in the short and medium term, as they can be progressively deployed using existing aircraft and fuel infrastructure.

This Master's Thesis presents a techno-economic comparison of two synthetic SAF production pathways based on renewable hydrogen and captured carbon dioxide: the Fischer-Tropsch (FT) route and the Methanol-to-Jet (MtJ) route. Both pathways enable the production of liquid hydrocarbons compatible with aviation requirements, but they differ significantly in terms of process architecture, conversion efficiency, technological maturity, regulatory status, capital expenditure and final fuel production costs.

Regulatory framework

To provide context for the analysis, the thesis first reviews the regulatory framework governing SAF deployment, including CORSIA, the relevant ASTM fuel certification standards and the ReFuelEU Aviation Regulation. This framework is essential, as the viability of SAF depends not only on technical performance but also on certification requirements, sustainability criteria and regulatory mechanisms capable of creating market demand.

Main SAF & e-SAF production pathways

The thesis then examines the main SAF production pathways, distinguishing between biogenic routes and synthetic fuels or e-SAF. Within the latter category, particular attention is given to the comparison between FT and MtJ. The Fischer-Tropsch route is characterized by greater technological and regulatory maturity, as well as extensive industrial experience. However, it generates a broad distribution of products, meaning that not all converted carbon is directed towards the SAF fraction. In contrast, the Methanol-to-Jet route uses methanol as an intermediate product and offers a higher potential selectivity towards hydrocarbons within the kerosene range, although it currently has lower commercial maturity and an evolving regulatory status.

Economic model development

The second part of the work develops an economic model in Excel to compare both pathways under homogeneous assumptions. The model boundaries are limited to the fuel synthesis and conversion stages, considering renewable hydrogen and captured CO₂ as externally supplied feedstocks. Consequently, neither hydrogen production through electrolysis nor carbon capture processes are explicitly modelled, allowing the analysis to focus on the intrinsic differences between the conversion routes. The model estimates annual SAF production, feedstock consumption, capital expenditure (CAPEX), operational expenditure (OPEX), required selling price, Levelized Cost of SAF (LCoSAF), equity Internal Rate of Return (IRR), Debt Service Coverage Ratio (DSCR) and several sensitivity analyses.

Analysis of results

The following table shows the main results of the analysis.

	MTJ	FT-PtL
SAF production (t)	77.626	68.493
IRR equity (%)	12,0%	12,0%
Payback (year)	12	12
SAF selling price(€)	5.588	6.253
LCoSAF (euros/Kg SAF)	6,83	7,70
Feedstock costs (€m)	(358,37)	(355,71)
H2 efectivo (tH ₂ /tSAF)	0,59	0,67
CO ₂ efectivo (tCO ₂ / tSAF)	4,16	4,39
CAPEX (€m)	395,3	345,9
DSCR	1,6x	1,6x

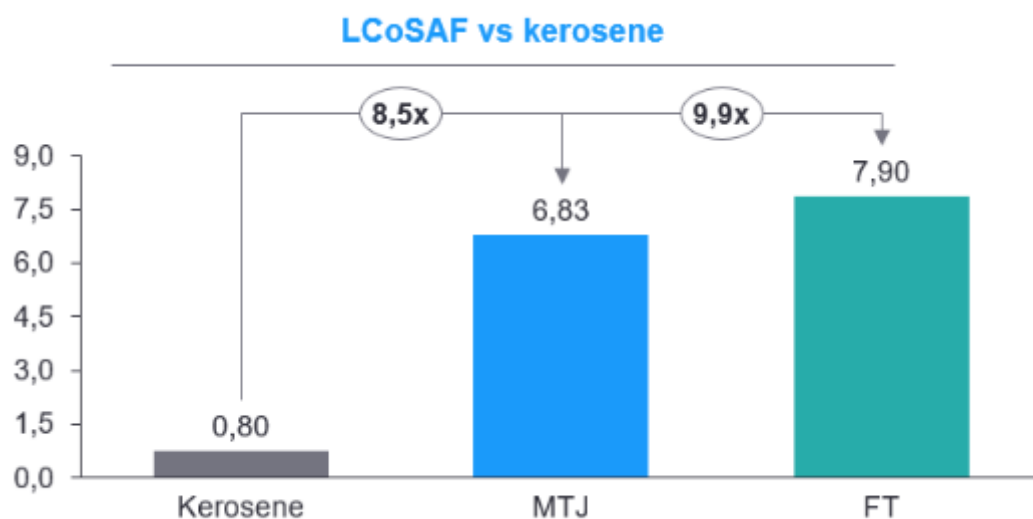
Main results of the analysis.

The results indicate that, within the analyzed base case, the MtJ pathway achieves a more favorable economic performance than FT. Although MtJ requires a higher initial investment, it is compensated for by a higher annual SAF production. In the model, MtJ reaches approximately 77,625 tonnes of SAF per year, compared with around 68,493 tonnes for the FT route. This higher production allows fixed costs to be distributed over a larger fuel output and contributes to reducing the unit production cost.

The main economic indicator used for comparison is the Levelized Cost of SAF (LCoSAF). In the base case, MTJ achieves an LCoSAF of €6.83/kg, whereas FT reaches €7.70/kg. This difference is not driven by a lower CAPEX, but rather by a higher effective conversion towards the SAF fraction and a more efficient utilization of feedstocks within the model boundaries. Furthermore, the sensitivity analysis highlights that the price of renewable hydrogen is one of the most influential variables affecting the competitiveness of both pathways, as it represents a substantial share of operating costs.

Conclusions

Despite these results, the study concludes that neither pathway is currently cost-competitive with conventional fossil jet fuel without regulatory support, technological cost reductions or dedicated incentive mechanisms.



Levelized costs of both pathways vs kerosene.

FT benefits from greater technological maturity and lower regulatory risk, potentially facilitating its deployment during the initial stages of market development. On the other

hand, MtJ emerges as an alternative with greater economic potential under the assumptions considered, although its future deployment will depend on the consolidation of its certification status, industrial scale-up and the reduction of technological and financial uncertainties.

Ultimately, this work demonstrates that the development of synthetic SAF depends on the interaction between technology, regulation, renewable hydrogen availability, access to suitable carbon sources, financing conditions and industrial integration. The comparison between FT and MtJ shows that selecting a production pathway should not be based solely on estimated unit costs, but also on the balance between efficiency, technological maturity, regulatory risk and scalability. Therefore, synthetic SAF could play a significant role in the decarbonization of aviation, provided that their deployment is supported by a stable regulatory framework, a progressive reduction in renewable hydrogen costs and an industrial strategy capable of mobilizing large-scale investment.

Índice de la memoria

Capítulo 1. Introducción	1
1.1 Punto de Partida e Introducción a SAF	2
1.2 Objetivos del trabajo	3
1.2.1 Alineamiento con los ODS	4
1.3 Enfoque Metodológico.....	4
Capítulo 2. Marco Regulatorio	6
2.1 Marco Internacional: Regulación CORSIA	6
2.1.1 CORSIA SAF	7
2.2 Normas Técnicas.....	9
2.2.1 Norma ASTM D1655.....	9
2.2.2 Norma ASTM D7566.....	9
2.2.3 Norma ASTM D4054.....	10
2.3 Marco Europeo.....	11
2.3.1 Inicios y Fit for 55.....	11
2.3.2 ReFuelEU Aviation	12
Capítulo 3. Vías de producción SAF y e-SAF	16
3.1 Biocombustibles.....	17
3.1.1 Hydroprocessed Esters and Fatty Acids (HEFA)	17
3.1.2 Alcohol-To-Jet (AtJ).....	18
3.1.3 Fischer - Tropsch (FT).....	20
3.2 E-fuels	21
3.3 Comparativa de procesos existentes.....	24
Capítulo 4. Evaluación de rutas PtL.....	25
4.1 Arquitectura y complejidad de los procesos	25
4.1.1 Arquitectura en FT.....	25
4.1.2 Arquitectura en MTJ	26
4.2 Eficiencia de uso del carbono	27
4.2.1 Eficiencia en la ruta FT	28
4.2.2 Eficiencia en la ruta MTJ.....	28

4.3	Eficiencia energética y Requerimiento de H2.....	29
4.3.1	<i>Eficiencia energética y requerimiento de H2 en la ruta FT</i>	29
4.3.2	<i>Eficiencia energética y requerimiento de H2 en la ruta MTJ</i>	30
4.4	Implicaciones económicas y escalabilidad industrial	31
Capítulo 5.	<i>Desarrollo del modelo</i>	34
5.1	Descripción y alcance del modelo.....	34
5.2	Hipótesis planteadas sobre la planta	36
5.3	Hipótesis para la construcción del CAPEX	37
5.4	Hipótesis financieras	38
5.5	Indicadores calculados y criterio de interpretación.....	39
Capítulo 6.	<i>Análisis de resultados</i>	42
6.1	Comparativa general	42
6.2	Análisis de sensibilidad.....	45
6.2.1	<i>Análisis del OPEX</i>	45
6.2.2	<i>Análisis del CAPEX</i>	47
6.2.3	<i>Análisis de la deuda</i>	49
6.2.4	<i>Otros análisis relevantes</i>	50
Capítulo 7.	<i>Conclusiones</i>	55
7.1	Limitaciones y trabajos futuros.....	57
Capítulo 8.	<i>Bibliografía</i>	59
ANEXO I	62	
ANEXO II	65	
ANEXO III	70	
	Análisis del WACC	70

Índice de ilustraciones

Ilustración 1: Mandatos de SAF para 2050 (ReFuelEU Aviation;2023).....	14
Ilustración 2: Proceso HEFA simplificado	18
Ilustración 3: Proceso AtJ simplificado	19
Ilustración 4: Proceso FT simplificado (IEA Bioenergy, 2024).....	20
Ilustración 5: Diagrama simplificado de la arquitectura FT	26
Ilustración 6: Diagrama simplificado de la arquitectura MtJ	27
Ilustración 7: Diagrama de flujos de energía para la ruta FT (Bube et al, 2024)	30
Ilustración 8: Diagrama de flujos de energía para la ruta metanol (Bube et al; 2024).....	31
Ilustración 9: Flowchart de los procesos seguidos en el modelo Excel.....	35
Ilustración 10: Gráfico con el desglose de costes del LCoSAF	45
Ilustración 11: Tabla de feedstocks para MtJ	46
Ilustración 12: Tabla de precios de feedstocks para FT	46
Ilustración 13: LCoSAF en función del precio del H2 y del rendimiento de la planta en MTJ	47
Ilustración 14: LCoSAF en función del precio del H2 y del rendimiento de la planta en FT	47
Ilustración 15: TIR en función del precio del hidrógeno y CAPEX en MtJ	48
Ilustración 16: TIR en función del precio del hidrógeno y CAPEX en FT-PtL.....	48
Ilustración 17: LCoSAF en función del precio de hidrógeno y CAPEX.....	49
Ilustración 18: LCoSAF en función del precio del H2 y CAPEX para FT	49
Ilustración 19: DSCR mínimo en función de % deuda y tipo de interés.....	50
Ilustración 20: LCoSAF en función de la carga de la planta.....	51
Ilustración 21: LCoSAF en función de la capacidad de la planta en caso ideal.....	52
Ilustración 22: Gráfico LCoSAF vs queroseno fósil	53
Ilustración 23: Coste de abatimiento de cada ruta en el modelo	54

Índice de ecuaciones

Ecuación 1: Reacción química RWGS	26
Ecuación 2: Ecuación simplificada del proceso FT.....	26
Ecuación 3: Reacción química del metanol.....	26
Ecuación 4: Reacción simplificada del proceso MtJ	27
Ecuación 5: Fórmula de cálculo del CAPEX	38
Ecuación 6: Fórmula del LCoSAF	40
Ecuación 7: Fórmula del DCSR	40
Ecuación 8: Fórmula del coste de abatimiento.....	41
Ecuación 9: Cálculo del coste del equity	70

Índice de tablas

Tabla 1: Implantación de combustibles SAF en aeropuertos europeos (Anexo 1, ReFuelEU Aviation, 2023).....	13
Tabla 2: Resumen de las tecnologías SAF	24
Tabla 3: Tabla comparativa de las rutas PtL tratadas	33
Tabla 4: Hipótesis de la planta	37
Tabla 5: Hipótesis para el CAPEX de la planta.....	38
Tabla 6: Hipótesis financieras del modelo	39
Tabla 7: Principales resultados generales del modelo	43
Tabla 8: Desglose del cálculo del LCoSAF.....	44
Tabla 9: Cálculo del WACC en el modelo	71

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

Descarbonizar el sector de la aviación se ha convertido en uno de los retos más difíciles a los que se enfrentan los países en la cuestión de abordar el reto climático. Según la *International Air Transport Association* (IATA), la industria del transporte aéreo es responsable entre el 2 y 3 % de las emisiones de gases de efecto invernadero a nivel global. Además, no solo emiten gases de efecto invernadero, si no que su impacto es mayor, con emisiones de otros gases nocivos como NO_x, consumiendo grandes cantidades de petróleo. Aunque las emisiones de CO₂ puedan ser menores que las de otros sectores industriales o de transporte, la aviación presenta características que dificultan especialmente su descarbonización: una elevada demanda energética por unidad de masa transportada, necesidad de combustibles con alta densidad energética y la incapacidad de la electrificación. Es por ello que sea tan relevante analizar las posibles vías para reducir al máximo los efectos nocivos de una industria tan necesaria para el desarrollo del ser humano.

De aquí nace la motivación de este proyecto, que no es otra que entender que tecnología es más interesante a nivel técnico y económico para la descarbonización del sector. Ayudar a cumplir este objetivo es una tarea que no es fácil, y que sin embargo se ha vuelto necesaria y la orden del día de la agenda política. Por ejemplo, la Unión Europea, a través del reglamento *ReFuelEU Aviation* ha empezado a mover ficha y ha establecido un marco para facilitar el objetivo de descarbonizar el sector de la aviación.

A diferencia de otros sectores de transporte donde es posible el uso de electricidad u otras tecnologías, las peculiaridades del transporte aéreo dificultan el desarrollo de alternativas viables para conseguir una mejora en la tecnología que limite este impacto climático. Además, las elevadas cantidades de energía que son necesarias para los vuelos de media y larga distancia complican el desarrollo de alternativas viables. En este contexto, los combustibles de aviación sostenibles (Sustainable Aviation Fuels) o SAF, se presentan como la opción más realista para reducir las emisiones del sector de la aviación. Estos combustibles, que se desarrollan en más detalle en el capítulo 3 de este trabajo, son

compatibles con la infraestructura existente en el sector, y ayudan a limitar el impacto que tiene la industria aeronáutica en el medio ambiente. No obstante, estas tecnologías se encuentran con un grado de madurez limitado, y son muy caras aún para considerarse como una alternativa real al combustible fósil utilizado hoy en día.

1.1 PUNTO DE PARTIDA E INTRODUCCIÓN A SAF

La aviación moderna se ha construido a través del combustible queroseno fósil. Este producto, que se consigue a través de la destilación fraccionada del petróleo, se convirtió en el combustible a utilizar en la aviación gracias a sus buenas propiedades. Gracias a estas propiedades, de las que destacan su alta densidad energética, superior a 40 MJ/kg, y su facilidad de almacenamiento; el queroseno se impuso como la única alternativa viable para los vuelos de media y larga distancia. Por esto es difícilmente sustituible, y se ha invertido mucho dinero y tiempo en los procesos en los que se obtiene para abaratar aún más los costes, y que en consecuencia sea cada vez más difícil encontrar alternativas competitivas en costes.

Sin embargo, como se mencionó anteriormente, es el responsable de unas altas emisiones de CO₂ además de muchos otros efectos nocivos en la atmósfera. Por ello, se vuelve imperativo el desarrollo de una nueva vía para conseguir reducir el impacto nocivo de la industria en el planeta.

Los SAF se definen como los combustibles líquidos para turbinas de aviación que se obtienen a través de materias primas sostenibles, tanto biogénicas como sintéticas. Estos se presentan como la alternativa directa al queroseno fósil, postulándose como una alternativa de transición inmediata para la descarbonización del sector aéreo. Es la manera más realista que existe actualmente para reducir las emisiones del sector en el corto y medio plazo. Como se ha mencionado anteriormente, el interés en estos combustibles nace de que no plantean una ruptura tecnológica completa en el sector de la aviación, sino una sustitución progresiva al queroseno fósil. Esto es especialmente relevante para un sector donde la renovación de la flota es lenta, los estándares de seguridad son muy estrictos y cualquier cambio tecnológico debe ser compatible con una operación global estandarizada.

1.2 OBJETIVOS DEL TRABAJO

El objetivo principal del trabajo es realizar un análisis tecno-económico de dos rutas de producción de combustible sostenible de aviación Power-to-Liquid, concretamente las rutas Fischer-Tropsch (FT) y la ruta Methanol-to-Jet (MtJ), ambas basadas en el empleo del hidrógeno renovable y carbono capturado como materias primas principales. Con ello se pretende establecer cuál de las dos rutas presenta una posición más favorable desde el punto de vista técnico, económico y de escalabilidad, para aportar una visión integrada que permita valorar el potencial de ambas tecnologías dentro del proceso de descarbonización del sector de la aviación.

En este trabajo se seleccionan las rutas FT y MtJ porque representan dos de las alternativas sintéticas más relevantes para la producción de SAF a partir de hidrógeno renovable y carbono capturado. La ruta FT cuenta con una mayor madurez tecnológica y regulatoria, mientras que la ruta MtJ presenta un interés creciente por su potencial de selectividad hacia fracciones compatibles con queroseno. La comparación entre ambas permite analizar el equilibrio entre madurez, eficiencia técnica, coste, escalabilidad y riesgo regulatorio.

Entre los objetivos secundarios destacan:

- Contextualizar el papel fundamental de los SAF dentro de la transición energética del sector aéreo.
- Analizar el marco regulatorio y normativo que condiciona el desarrollo y la utilización de combustibles SAF, prestando especial atención a la normativa europea *ReFuelEU Aviation*.
- Estudiar el mercado de las principales tecnologías SAF, para poder situar a las rutas PtL FT y MtJ dentro del conjunto de alternativas disponibles.
- Comparar técnicamente las rutas FT y MtJ para identificar ventajas e inconvenientes de cada alternativa antes de entrar en su viabilidad económica.
- Desarrollar un modelo económico en Excel que permita estimar y comparar los principales indicadores financieros de ambas rutas.

- Desarrollar una visión a futuro del mercado SAF basado en hidrógeno, con tecnología FT o MtJ, identificando los principales factores que condicionarán su escalabilidad.

1.2.1 ALINEAMIENTO CON LOS ODS

Asimismo, el trabajo se encuentra alineado con varios Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas.

- **ODS 7: Energía asequible y no contaminante**, al analizar rutas de producción de combustible basada en el uso de hidrógeno verde y carbono capturado.
- **ODS 9: Industria, innovación e infraestructura**, dado que estudia tecnologías emergentes con potencial de transformar la industria energética y aeronáutica hacia modelos más sostenibles.
- **ODS 12: Producción y consumo responsables**, porque evalúan alternativas al queroseno fósil de manera que permiten avanzar hacia un uso más eficiente de los recursos y una reducción de la dependencia de combustibles convencionales.
- **ODS 13: Acción por el clima**, ya que el objetivo es analizar soluciones tecnológicas que contribuyan a la descarbonización del sector de la aviación.

1.3 ENFOQUE METODOLÓGICO

La metodología utilizada en este trabajo de fin de máster se puede dividir en dos grandes bloques. La primera es una revisión bibliográfica y documental exhaustiva, con el fin de comprender el contexto tecnológico, normativo y económico de los combustibles sostenibles de aviación. El segundo bloque se ha desarrollado un modelo económico en Excel con el objetivo de comparar bajo hipótesis homogéneas la viabilidad de las rutas FT y MtJ para la producción de SAF.

El primer bloque se ha basado en la consulta de artículos científicos, informes sectoriales, documentación técnica de organismos internacionales y normativa aplicable al uso de combustibles SAF. Esta revisión ha permitido identificar las principales rutas de producción

existentes, su grado de madurez tecnológica y el potencial de escalabilidad y su encaje dentro del marco regulatorio actual. Dentro de esta revisión se ha puesto especial atención a las denominadas rutas e-SAF, y en concreto la ruta de FT y MtJ. Gracias a esto, se han podido establecer los puntos de partida para el modelo económico y los principales criterios de comparación entre estas dos rutas.

El segundo bloque se centra en la construcción de un modelo económico utilizando la herramienta Excel. El modelo se ha construido con el objetivo de comparar ambas rutas bajo una misma perspectiva financiera y operativa, de manera que las diferencias obtenidas respondan principalmente a las características específicas de cada tecnología. Para ello se han definido hipótesis comunes relativas al tamaño de planta, horas de operación, vida útil de la planta, tipo impositivo, financiación o coste de capital. El modelo parte de la metodología Lazard, fijando una TIR objetivo para obtener a través de la iteración el precio al que hay que vender el combustible para alcanzar esa TIR.

Para finalizar, se han realizado unos análisis de sensibilidades sobre las variables más relevantes del modelo con el objetivo de entender que variables condicionan en mayor medida la competitividad de cada ruta y ver como las condiciones del caso base se mantienen en escenarios alternativos.

Esta metodología permite conectar la revisión técnica de la literatura con el análisis económico cuantitativo, proporcionando una comparación integrada entre FT y MtJ. Sin embargo, el modelo no deja de ser una aproximación preliminar, ya que no incorpora de manera explícita ciertos elementos en la planta, y tiene en cuenta una serie de hipótesis de base que pueden variar en un caso real.

Capítulo 2. MARCO REGULATORIO

Antes de comenzar con el estudio exhaustivo de las tecnologías existentes en combustibles de aviación, es necesario entender primero el marco regulatorio que rige y marca las pautas a seguir por los desarrolladores de estas tecnologías. Este marco va a estar presente a lo largo de todo el trabajo, y por ello es imperativo entender en que consiste.

El entorno de los combustibles de aviación viene fuertemente regulado por estrictas pautas tecnológicas, para que los combustibles mantengan unas condiciones de funcionamiento idóneas y no pongan en peligro los vuelos donde se operan. Además, y en línea con el contexto de este trabajo, hay una fuerte regulación condicionada por objetivos climáticos y de desarrollo, con el fin de minimizar el impacto de estos combustibles en el medio ambiente y en su papel en el cambio climático.

2.1 MARCO INTERNACIONAL: REGULACIÓN CORSIA

La regulación sobre el “*Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation*” o CORSIA, desarrollada por la ICAO (*International Civil Aviation Organization*) es un marco regulador a nivel internacional con el objetivo de limitar las emisiones de CO₂ a la atmósfera en la aviación. Se desarrolló en el año 2016 y con su puesta en marcha en el 2021, supone el primer intento por parte de una organización a nivel mundial de reducir el problema de emisiones por parte de la industria de la aviación.

Este reglamento se enmarca en los compromisos que se establecieron por parte de todos los países acerca del cambio climático, pero tiene su marco de operación fuera de ellos. El principal objetivo de CORSIA es que las emisiones de CO₂ por parte de la aviación internacional se mantengan en niveles del 85% de las que había en el año 2019, de forma que los operadores compensen las emisiones por encima de esta base. Para esto se apoya entre otros en:

- Monitorización, notificación y verificación (MRV) obligatorios para aerolíneas con vuelos internacionales.
- Adquisición de créditos de carbono para compensar las emisiones que excedan la línea base establecida.
- Promoción del uso de CORSIA Eligible Fuels, mediante el reconocimiento de reducciones de emisiones verificables.

Esto añade además una señal económica muy importante a favor de los combustibles con menor intensidad de carbono. Y por eso, los operadores pueden reducir sus obligaciones de compensación mediante el uso de estos combustibles CORSIA, siempre que cumplan con los criterios de sostenibilidad y reducción de emisiones en el ciclo de vida que establece la ICAO.

2.1.1 CORSIA SAF

Según el marco CORSIA, los combustibles SAF y LCAF (*Lower Carbon Aviation Fuels*) pueden ser utilizados por los operadores de aeronaves para obtener reducciones verificadas de emisiones, siempre que cumplan los criterios de sostenibilidad establecidos.

En el caso de este proyecto, es especialmente relevante la organización y el reconocimiento por parte de CORSIA de los SAF. El objetivo de la regulación en estos combustibles nace de la necesidad de establecer que, la reducción de emisiones que se han conseguido a través del uso de SAF sea real, verificable y sostenible, de manera que no se genere un impacto negativo en el medio ambiente por culpa del uso de estos combustibles. Por ejemplo, si al desarrollar un combustible SAF, se está dañando la biodiversidad de la zona, esta reducción de emisiones es contrarrestada por el daño causado a otra parte del medio ambiente. Es por ello por lo que no solo deben generar unas reducciones netas de gases de efecto invernadero respecto al queroseno convencional, si no que tienen que seguir unos criterios de sostenibilidad, sociales y de gobernanza.

A continuación, se nombran algunos criterios que se consideran relevantes para poder contextualizar mejor los SAF. Para encontrar los criterios al completo referirse al Anexo I (ICAO, 2025)

- **Gases de efecto invernadero:** los SAF lograrán una reducción neta de las emisiones de gases de efecto invernadero de al menos un 10% respecto a las emisiones del ciclo de vida del combustible de referencia de 89 gCO₂-eq/MJ.
- **Reservas de carbono:** los combustibles no pueden producirse a través de fuentes de biomasa que han sido extraídas de zonas, que, desde 2008, hayan sido consideradas como zonas de altas reservas en carbono
- **Permanencia de las reducciones:** al emplear tecnologías de captura de carbono, deberán implementarse soluciones para mitigar, monitorizar y compensar cualquier liberación de carbono.
- El resto de los criterios se refieren más específicamente a criterios de medio ambiente, como son el suelo, agua, residuos... y a criterios sociales y de gobernanza como derechos humanos, derechos laborales, propiedad del suelo...

Con respecto a los gases de efecto invernadero, es importante destacar que los criterios de sostenibilidad establecidos por la Unión Europea son significativamente más exigentes que los definidos en el marco de CORSIA. Mientras que CORSIA únicamente requiere que un combustible sostenible de aviación alcance una reducción mínima del 10% de las emisiones de gases de efecto invernadero en el ciclo de vida, el marco regulatorio europeo exige reducciones de al menos el 65% y, para determinadas instalaciones de nueva construcción, del 70%, tomando como referencia un valor fósil de 94 gCO₂-eq/MJ. En consecuencia, un combustible puede ser elegible bajo los criterios de CORSIA y, sin embargo, no cumplir los requisitos necesarios para ser contabilizado como SAF bajo el marco regulatorio europeo.

En definitiva, el reglamento CORSIA es por tanto un elemento clave para la descarbonización de aviación comercial ya que proporciona un marco que seguir a nivel global. Además, la especificación sobre los C-SAF marca unas directrices claras sobre su utilización y fabricación.

2.2 NORMAS TÉCNICAS

Una vez establecido el contexto SAF a nivel mundial gracias a CORSIA, es necesario ver las especificaciones técnicas que son necesarias para la viabilidad y la utilización de los combustibles. Dentro del mundo SAF es especialmente importante, ya que definen al detalle las propiedades fisio-químicas que deben cumplir estos combustibles de manera que puedan ser utilizados por motores convencionales. Entre estas normas técnicas, destacan en especial dos: ASTM D1655 y ASTM D7566

2.2.1 NORMA ASTM D1655

La norma ASTM D1655 (*Standard Specification for Aviation Turbine Fuels*) es la norma que rige la técnica de todos los combustibles de uso generalizado, Jet A o Jet A-1. La diferencia entre ambos se basa en un diferente punto de congelación, que es más restrictivo para Jet A-1 (-47°C vs -40°C) y la obligatoriedad del Jet A-1 en llevar un aditivo antiestático. El Jet-A es utilizado en Estados Unidos, mientras que el Jet A-1 se utiliza en el resto del mundo.

Por tanto, la norma ASTM D1655 tiene el objetivo de garantizar un nivel de calidad y seguridad en los vuelos a nivel mundial. Cualquier combustible que se utilice en la aviación está regulado por esta norma.

2.2.2 NORMA ASTM D7566

La norma ASTM 7566 (*Standard Specification for Aviation Turbine Fuels containing Synthesized Hydrocarbons*) es la más interesante para este trabajo, ya que es la que rige de forma concreta el uso de combustibles que contengan cualquier tipo de componente sintético. En este caso se agrupan los combustibles e-SAF, y por tanto es la norma que establece las características y las propiedades que deben tener estos combustibles, así como las cantidades necesarias para que se utilicen de forma segura.

Dentro de esta norma, las diferentes rutas SAF (de las cuales se habla en más detalle en el capítulo 3 de este trabajo) vienen agrupadas en diferentes anexos. Esto es porque cada

proceso de conversión de combustible a SAF tiene unas características propias y unos requisitos de seguridad específicos. En estos anexos se regula, entre otros: materia prima y proceso químico de conversión aceptados, propiedades de proceso, límites de mezcla con Jet A o Jet A-1, procesos que se llevan a cabo para su verificación como ruta SAF y propiedades que ha de cumplir el combustible sobre densidad, lubricidad, punto de congelación o punto de inflamación; que garantizan que este combustible pueda ser utilizado en aviación convencional.

El punto final importante que tiene esta norma es que tiene un final en sí misma, porque, una vez el combustible sintético ha cumplido con todos los criterios de seguridad de la norma y es mezclado con Jet A o Jet A-1, se re-declara ASTM D1655. Este punto es muy importante, ya que deja de regir la norma específica de combustibles sintéticos, y se utiliza la norma general. Esto hace que sea indistinguible el combustible de uno de aviación general, y por tanto puede comercializarse, transportarse y suministrarse en las mismas condiciones que el combustible convencional, sin necesidad de tener infraestructura nueva o específica para su uso. Este punto es clave para que SAF pueda ser considerado como una alternativa de descarbonización viable y escalable, ya que evita trabas logísticas y técnicas que impedirían la rápida adopción de estos combustibles.

2.2.3 NORMA ASTM D4054

La última norma técnica que se va a comentar en este apartado es la ASTM D4054 (*Standard Practice for Qualification and Approval of New Aviation Turbine Fuels*). Esta norma tiene relevancia porque establece los procedimientos necesarios para que se aprueben y se evalúen nuevas rutas de combustible, para su futura incorporación en ASTM D1655 o ASTM D7566. Por lo tanto, es la norma que establece el mecanismo previo para su certificación.

Dentro de este mecanismo, el proceso de cualificación a seguir incluye:

- Evaluación inicial en el laboratorio, donde se evalúan las propiedades que va a tener ese combustible.

- Ensayos en componentes y sistemas, donde se evalúa cómo se comporta el combustible en componentes críticos como filtros o bombas.
- Pruebas en motores.
- Evaluación operacional, que valora que efectos a largo plazo tiene el combustible.

Esta norma es relevante para el trabajo para la valoración de rutas emergentes de producción de combustible, como es Methanol-to-Jet, ya que no valora el combustible en sí, si no el proceso mediante el cual ese combustible puede ser reconocido. Esta norma es un paso indispensable para cualquier nueva ruta SAF que se quiera desarrollar.

2.3 MARCO EUROPEO

Una vez entendido el contexto global que engloba los combustibles de aviación y las normas técnicas necesarias para su desarrollo, es necesario ver el marco que regula el contexto que más afecta al presente trabajo, que es el europeo. La Unión Europea se ha postulado como el organismo regulador líder en la transición hacia la descarbonización y en la lucha contra el cambio climático. En el caso del sector de la aviación no es distinto, y la Unión ha desarrollado un marco regulatorio extenso y propio a través de directivas o reglamentos, que sientan las bases para la descarbonización del sector.

2.3.1 INICIOS Y FIT FOR 55

El primer paso que dio la Unión Europea fue en el año 2012, cuando se introduce el transporte aéreo dentro del EU Emissions Trading System (ETS), para monitorizar con mayor detalle las emisiones del sector aéreo. Este sistema incluye todos los sectores, en el que se establece que todos deben contribuir para alcanzar los ambiciosos objetivos climáticos. Además, con la directiva RED II, en el año 2018, la UE establecía un mandato para el sector del transporte: lograr un 14 % de consumo de energía renovable para el año 2030. Sin embargo, ninguno de estos dos marcos incluía nada sobre el uso de los SAF y su implementación para el sector aéreo.

En el año 2021, la Unión Europea estableció el paquete legislativo Fit for 55, en el cual incluía medidas más claras y con un objetivo común: reducir las emisiones netas de gases de efecto invernadero un 55% para el año 2030 frente al 1990. Este paquete, que regulaba de manera más concisa y ambiciosa, establecía diecisiete propuestas legislativas para abarcar de manera mejor industrias distintas.

Este paquete introdujo la evolución de la directiva RED II a RED III, en el cual se refuerza el uso de las energías renovables como vehículo de descarbonización, y además aumenta la cuota de combustible de origen renovable en el transporte, estableciendo unos objetivos mucho más ambiciosos. Además, se reconoce a los SAF como un elemento estratégico importante en el que centrar los esfuerzos para obtener los ambiciosos objetivos de neutralidad climática.

Sin embargo, la parte más relevante para el proyecto que introdujo Fit for 55 fue un reglamento para la obligatoriedad en el uso de combustibles sostenibles en el sector aéreo en la Unión Europea, el *ReFuelEU Aviation*. Este reglamento es clave para entender la importancia del SAF en la descarbonización del sector de la aviación.

2.3.2 REFUELEU AVIATION

El Reglamento (UE) 2023/2405, conocido como el *ReFuelEU Aviation*, es el primer paso hacia un marco europeo en el suministro y uso de combustibles sostenibles de aviación. Entró en vigor en enero de 2024, y es el motor para la industria SAF en Europa. Su objetivo se establece en el primer artículo de este: “El presente Reglamento establece normas armonizadas sobre la utilización y el suministro de combustibles de aviación sostenibles” (*ReFuelEU Aviation*, 2023). Este nace de la necesidad de crear un marco armonizado dentro de los combustibles de aviación.

2.3.2.1 Mandato de uso de SAF

Uno de los componentes más importante en el Reglamento es que establece la trayectoria obligatoria para la incorporación de los combustibles sostenibles en los aeropuertos de Europa. Este no se extiende a todos los aeropuertos europeos, sino a aquellos considerados

de la Unión Europea definidos en función de unos umbrales de actividad: 800 mil pasajeros al año o 100 mil toneladas de carga.

Una cuestión relevante del reglamento es que la obligación principal de incorporación de SAF no recae directamente sobre las aerolíneas, sino sobre los proveedores de combustible de aviación. Son estos proveedores quienes deben garantizar que el combustible puesto a disposición de los operadores aéreos en los aeropuertos de la Unión contiene los porcentajes mínimos de SAF exigidos por la normativa (ver Tabla 1). Por tanto, el reglamento actúa inicialmente sobre la oferta de combustible sostenible, obligando a que exista disponibilidad de SAF en el suministro aeroportuario europeo. No obstante, como se explica más adelante, el reglamento regula sobre las aerolíneas para controlar el uso del SAF que utilizan, y evitar prácticas de repostaje de combustible no SAF.

Este mandato sobre el uso del SAF se explica en el artículo 4 del marco *ReFuelEU* y explica los porcentajes de SAF que han de tener, además de unos que sean de origen sintético (PtL) y aparece detallado en el Anexo 1 del Reglamento. El porcentaje de SAF sintético es el mínimo de e-SAF que hay que alcanzar, mientras que el SAF se puede cubrir tanto con e-SAF como con bio-SAF, y viene resumido en la Tabla 1:

Año	Porcentaje de SAF	Porcentaje de SAF sintético
2025	2%	-
2030	6%	1,2%
2035	20%	5%
2040	34%	10%
2045	42%	15%
2050	70%	35%

Tabla 1: Implantación de combustibles SAF en aeropuertos europeos (Anexo 1, ReFuelEU Aviation, 2023)

Por tanto, la apuesta por parte de la Unión Europea por los combustibles SAF es clara, y el objetivo del año 2050 es ambicioso y demuestra que son un vehículo clave para la descarbonización del sector. El artículo 4 también sirve para establecer unas guías sobre la utilización de combustibles generados a través de hidrógeno, estableciendo que solo se reconocerán aquellos que se generan a través de hidrógeno sostenible y de captura de CO₂ sostenible.

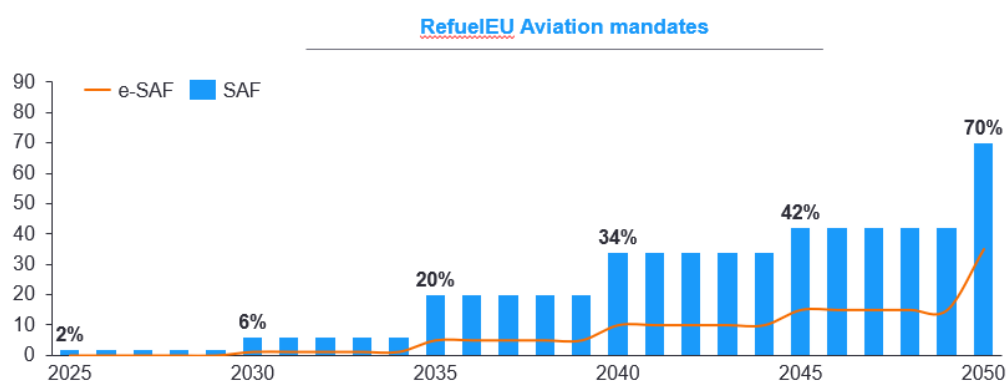


Ilustración 1: Mandatos de SAF para 2050 (ReFuelEU Aviation; 2023)

2.3.2.2 Obligaciones para aerolíneas y aeropuertos

Desde el artículo 5, el Reglamento trata de combatir el llamado “fuel tankering”. Este concepto es aquel en el que las aerolíneas llenan los aviones con gasolina extra, de lugares donde el precio es más barato. Esto hace que los aviones consuman más combustible, liberando más dióxido de carbono a la atmósfera (BBC News, 2019). Por ello, el Reglamento obliga a repostar en el aeropuerto de salida.

Además, el artículo 7 obliga a que los aeropuertos deben cooperar en el acceso a SAF y su disponibilidad para los aviones. También, deben invertir en la infraestructura del futuro que pueda permitir un escenario de una descarbonización en la industria aérea (electrificación o hidrógeno, por ejemplo).

2.3.2.3 Obligaciones de reporting

Los artículos 8 y 10 regulan las notificaciones que han de hacer de cara a futuro tanto aerolíneas como aeropuertos. Entre otros se van a notificar:

- Volumen total de combustible consumido y suministrado.
- Volumen adquirido y suministrado de SAF.
- Proceso de conversión de la materia prima y número de aromáticos que tienen estos combustibles.

De esta manera, desde el mandato europeo se pretende hacer un mayor control a la industria para revisar que estas implementaciones se están llevando a cabo de manera clara, garantizando la efectividad jurídica del mismo y evitando que el cumplimiento quede sujeto a unos pocos voluntarios o a dinámicas de mercado que acaban siendo insuficientes.

En conclusión, el marco europeo representa el sistema más ambicioso actualmente para impulsar el uso de los SAF. La combinación de las distintas directivas, y, sobre todo, del reglamento *ReFuelEU Aviation* genera:

- Una demanda garantizada y creciente de SAF, a través de las cuotas que han de cumplir las aerolíneas y los aeropuertos. Esto es sin duda indispensable para garantizar que haya inversiones industriales en el entorno.
- Un mercado específico para los combustibles sintéticos, que son la alternativa más atractiva para limitar las emisiones de gases a la atmósfera.
- Un marco de sostenibilidad riguroso, que está en línea con los objetivos de sostenibilidad europeos y que se sitúa a la cabeza de los objetivos de descarbonización del sector aéreo.

Una vez entendido el marco regulatorio que engloba a los SAF, es necesario entender que tecnologías existen actualmente dentro del sector para poder contextualizar bien el trabajo.

Capítulo 3. VÍAS DE PRODUCCIÓN SAF Y E-SAF

Dentro del entorno de los SAF es necesario entender cuáles son las tecnologías ya en uso y cuáles son las tendencias más favorables en el sector. Según la IATA, los combustibles SAF de uso directo son la alternativa de descarbonización más interesante y prometedora para alcanzar los retos de descarbonización del sector. Se llaman de uso directo, o “*drop-in*” en inglés, ya que son combustibles que se utilizan para el vuelo, y que sirven para reducir sustancialmente la cantidad de queroseno utilizado en un vuelo. La versatilidad reside en que no es necesario un cambio en la estructura interna de la turbina o motor del avión, sino que se mezclan directamente con el queroseno fósil.

Existen diferentes formas de obtención de SAF, según la forma de conversión. Además, estos se pueden mezclar hasta el 50% con queroseno Jet A-1 (ASTM D7566), reduciendo significativamente las emisiones en un vuelo. Según la IATA, estos combustibles de uso directo pueden reducir hasta en un 80% las emisiones de un vuelo que utiliza combustible Jet A-1. (IATA, 2024).

Sin embargo, el mayor reto sigue estando en cómo conseguir que la producción de estos combustibles sea a un coste competitivo. Además, el uso de SAF hace sacar a la luz el debate de “*food vs fuel*”, o cuánta materia prima se ha de quemar y de utilizar para conseguir el combustible. Esto puede traer problemas en el futuro como la deforestación u otros daños al medio ambiente significativos, que menguan el efecto positivo de reducción de gases de efecto invernadero que tienen los SAF en conjunto. Es por ello, que la norma ASTM D7566 mencionada anteriormente establece unas guías claras sobre la utilización de estas tecnologías, y se prevé que a medida que crezca el uso de SAF en el mundo, también evolucionen las normativas para establecer cuáles son los usos permitidos.

Una vez establecido el contexto global, se va a estudiar que tecnologías de SAF están actualmente disponibles en el mercado.

3.1 BIOCOMBUSTIBLES

Los biocombustibles para aviación constituyen la primera línea de combustibles capaces de sustituir de cierta manera al queroseno fósil. Estos son el punto de partida de los SAF, desde el cual ha surgido todo el desarrollo tecnológico que hay hoy en día. Estos combustibles provienen de materias primas que tienen su origen en la biomasa (aceites vegetales, grasas animales, residuos agrícolas...), que convierten el carbono de origen biológico en el hidrocarburo que se utiliza en la aviación.

El uso de estos biocombustibles presenta una ventaja clara, y es que el CO₂ liberado durante la combustión fue previamente capturado por los organismos que originaron la biomasa, y por tanto permite limitar el ciclo del carbono y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

Dentro de los biocombustibles, podemos encontrar diferentes tipos en función de su forma de producción, y lo más importantes se mencionan a continuación.

3.1.1 HYDROPROCESSED ESTERS AND FATTY ACIDS (HEFA)

El biocombustible más utilizado a nivel mundial debido a su alto nivel de madurez tecnológica (TRL 9) es la ruta HEFA (Detsios et al, 2023). Este proceso consiste en la generación del combustible a través de la hidrogenación y la desoxigenación de aceites y grasas (NLR, 2021). Como “*feedstock*” (materia prima) para generar este combustible se pueden usar aceites vegetales, grasas animales o aceites de cocina usados (UCOs). El proceso para conseguir el combustible se produce de la siguiente forma: una hidrogenación, donde se satura con hidrógeno; después una desoxigenación para eliminar el oxígeno que pueda haber en agua, CO o CO₂; y por último una isomerización y un craqueo donde se trata el combustible final para llevarlo a las condiciones necesarias para su uso convencional.

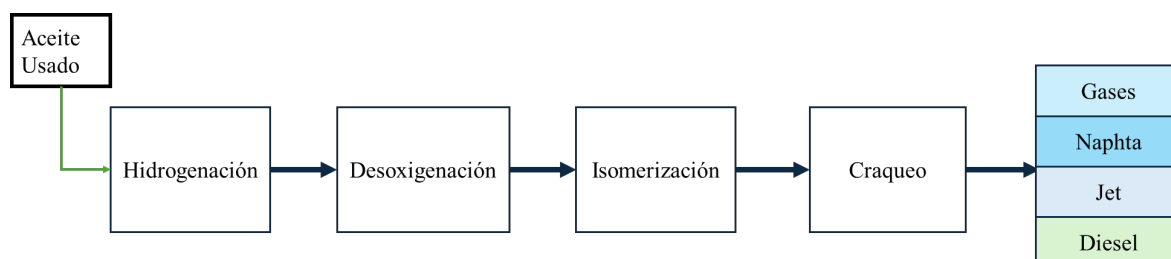


Ilustración 2: Proceso HEFA simplificado

Los HEFA son combustibles de alta energía, que se pueden introducir directamente en la turbina del avión sin necesidad de cambios mecánicos. Su uso habitual es el de este tipo, con un porcentaje cercano al 50% de queroseno y 50% de HEFA, de manera que se reducen las emisiones en gran manera. En 2023, se produjeron los primeros vuelos con 100% SAF en la historia de la aviación utilizando HEFA, siendo Virgin Atlantic la aerolínea que completó el primer vuelo transatlántico Londres - Nueva York.

Los combustibles HEFA reducen las emisiones de carbono entre un 70-80 % WtW (Well-to-wake), o de todo el ciclo de vida del combustible frente al queroseno (IEA Bioenergy,2024), y es la única vía actual que se utiliza de manera global, con plantas ubicadas en Estados Unidos, Europa o Asia. Destacan fabricantes como Neste (presencia en aeropuertos de los tres continentes) o World Energy (mayor presencia en Estados Unidos). Sin embargo, su limitación está condicionada a la cantidad de materias primas sostenibles disponibles (aceites usados,, grasas animales...), ya que el marco europeo excluye los biocombustibles producidos a través de cultivos alimentarios y forrajeros.

3.1.2 ALCOHOL-TO-JET (ATJ)

El proceso de AtJ se basa en la producción de biocombustible a través de alcoholes ligeros que provienen de origen biogénico, como el etanol o butanol. Para producir el combustible se sigue el siguiente proceso: una deshidratación del alcohol, para generar olefinas como el etileno; una oligomerización y después una hidrogenación, de manera que se generen y luego saturan los enlaces dobles de carbono; y por último un fraccionamiento para su uso como combustible de aviación.

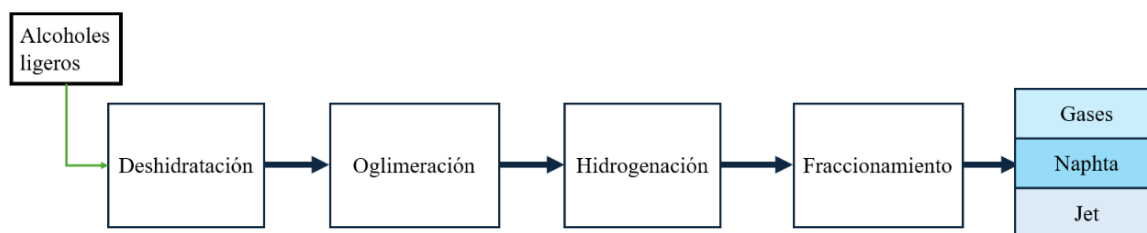


Ilustración 3: Proceso AtJ simplificado

Este proceso AtJ se encuentra en una fase de maduración menor que el SAF producido con HEFA (TRL 7-8), y proyectos importantes en Estados Unidos como el de LanzaJet, en Freedom Pines, y el de Gevo en Colorado. Sus principales ventajas radican en su flexibilidad, al poder emplear alcoholes de origen biogénico o sintético, y en la reducción potencial de emisiones WtW de 60-80 % según el origen del alcohol (Detsios et al, 2023). No obstante, presenta menor rendimiento energético global que HEFA y mayores requerimientos catalíticos, lo que incrementa su coste de producción.

Es importante destacar, que, no todas las variantes de AtJ están certificadas para su uso en Europa. En Europa, solo se pueden usar los combustibles tipo AtJ que cumplen con la norma ASTM D7566. Esto hace que se puedan reconocer dos tipos de combustible AtJ:

- ATJ-SPK a partir de isobutanol desarrollado principalmente por Gevo Inc, certificado desde 2016.
- ATJ-SPK a partir de etanol liderado por LanzaJet, certificado más recientemente en 2021.

La norma ASTM D7566 además permite que estos combustibles se mezclen hasta un 50% con queroseno fósil, y por consiguiente el producto final se considera combustible Jet A o Jet A-1, en función del mercado de destino.

Es importante notar que el combustible final no solo ha de cumplir con la normativa ASTM D7566, sino también con la especificación Def Stan 91-91. Esta especificación está desarrollada por el ministerio de defensa británico, y establece unos requisitos extra como control de calidad, trazabilidad y desempeño operativo específicos para el entorno europeo.

En el caso de los combustibles ATJ-SPK, esta norma exige verificar parámetros complementarios como la estabilidad térmica, el contenido máximo de aromáticos y azufre, y la conductividad eléctrica. Es decir, esta especificación se aplica sobre el combustible ya mezclado.

Las variantes de AtJ derivadas de otros alcoholes o con composiciones no incluidas en los anexos mencionados (por ejemplo, AtJ a partir de metanol o propanol) no se encuentran certificadas actualmente, y solo pueden emplearse en proyectos de investigación o vuelos de demostración bajo autorización específica de la autoridad aeronáutica competente.

3.1.3 FISCHER - TROPSCH (FT)

El proceso FT constituye una de las rutas más versátiles y prometedoras para la obtención de combustibles sintéticos sostenibles. Su principio se basa en la síntesis catalítica de hidrocarburos a partir de una mezcla gaseosa de monóxido de carbono (CO) e hidrógeno (H₂), conocida como gas de síntesis. El proceso consta de varias etapas. En primer lugar, la gasificación de biomasa o residuos sólidos produce el gas de síntesis. Este gas se purifica para eliminar impurezas como alquitranes o azufre antes de la síntesis FT, donde el CO y el H₂ reaccionan sobre catalizadores de hierro o cobalto, a temperaturas de 200-350 °C y presiones de 10-40 bar, y este producto se somete a hidrocrqueo e isomerización para obtener el rango deseado de queroseno.

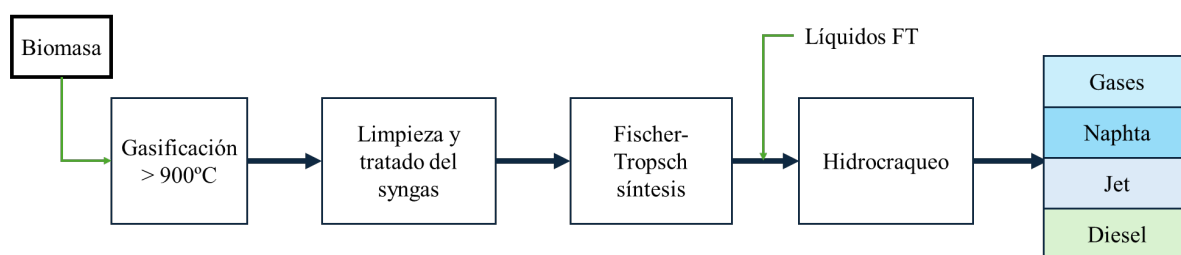


Ilustración 4: Proceso FT simplificado (IEA Bioenergy, 2024)

Aunque la tecnología fue desarrollada en el siglo XX para la conversión de carbón en combustibles líquidos y posteriormente aplicada al gas natural, su adaptación a biomasa y a sistemas de hidrógeno renovable la posiciona como un pilar central de la transición

energética (IEA Bioenergy, 2024). Esta última se encuentra entre sus grandes ventajas, además de utilizar una amplia variedad de materias primas (biomasa, CO₂ capturado, residuos sólidos urbanos) y la alta calidad del combustible resultante. Sin embargo, el proceso presenta altos requerimientos energéticos y de capital, además de una complejidad técnica considerable en la etapa de gasificación y purificación del gas.

La tecnología FT se encuentra en fase de demostración comercial (TRL 8), con proyectos destacados como los de Velocys en Reino Unido y Sunfire en Alemania (Detsios et al, 2023), orientados a producir combustibles sintéticos a partir de biomasa o CO₂ capturado. Cuando se combina con hidrógeno de origen renovable, la ruta FT-PtL puede lograr reducciones de emisiones WtW superiores al 90 % respecto al queroseno fósil, constituyendo una de las opciones más prometedoras para la descarbonización total del sector aeronáutico (IEA Bioenergy, 2024).

3.2 E-FUELS

La creciente limitación en la disponibilidad de materias primas biogénicas sostenibles ha impulsado el desarrollo de los combustibles sintéticos o e-fuels, una alternativa emergente que permite producir combustibles líquidos con emisiones netas de carbono prácticamente nulas. Estos combustibles, también denominados Power-to-Liquid (PtL), se obtienen a partir de electricidad renovable, hidrógeno verde generado mediante electrólisis del agua, y dióxido de carbono (CO₂) capturado de fuentes industriales o del aire. Su principio fundamental consiste en transformar energía eléctrica renovable en energía química almacenada en forma de hidrocarburos líquidos compatibles con los motores y la infraestructura de aviación existentes (IEA Bioenergy, 2024).

El proceso general PtL se compone de tres etapas principales:

- **Producción de hidrógeno verde (H₂)**

Se obtiene mediante electrólisis del agua, en la que la electricidad renovable (solar, eólica o hidroeléctrica) se emplea para separar las moléculas de H₂O en hidrógeno y

oxígeno. Los electrolizadores más comunes son de tipo PEM (Proton Exchange Membrane), alcalino y, en menor medida, de óxido sólido (SOEC). El hidrógeno así generado se considera “verde” cuando la electricidad empleada proviene íntegramente de fuentes renovables.

- **Captura y suministro de dióxido de carbono (CO₂)**

El carbono necesario para la síntesis de hidrocarburos puede obtenerse de corrientes concentradas de procesos industriales (fermentación, cementeras o plantas químicas), o bien mediante captura directa del aire (DAC). En ambos casos, el objetivo es reciclar el carbono atmosférico y cerrar el ciclo del CO₂, de modo que las emisiones derivadas de la combustión del combustible sintético sean compensadas por el CO₂ capturado en su producción.

- **Síntesis de hidrocarburos líquidos**

El hidrógeno y el CO₂ capturado se combinan para generar moléculas intermedias como el monóxido de carbono (CO) o el metanol (CH₃OH), que posteriormente se transforman en hidrocarburos líquidos mediante procesos catalíticos. Las dos rutas de mayor relevancia para el sector aeronáutico son:

- La síntesis Fischer-Tropsch (FT-PtL), en la que el gas de síntesis se convierte directamente en una mezcla de parafinas que, tras su fraccionamiento e hidrotratamiento, producen queroseno sintético.
- El proceso Methanol-to-Jet (MtJ-PtL), que utiliza metanol producido a partir de CO₂ e hidrógeno como intermediario, transformándolo en olefinas y posteriormente en hidrocarburos de cadena media.

Estas dos vías constituyen actualmente las rutas tecnológicas más prometedoras para la producción de SAF totalmente sintéticos en el marco europeo (*ReFuelEU Aviation*, 2023). En el apartado 4 de este trabajo se detallan estas dos rutas en mayor medida.

Los combustibles sintéticos PtL presentan una serie de ventajas estratégicas y ambientales frente a los biocombustibles convencionales, siendo la más destacable la neutralidad de carbono, ya que al utilizar CO₂ capturado y energía renovable, el ciclo completo puede considerarse cerrado en carbono, reduciendo las emisiones netas WtW hasta un 90–100 %

respecto al queroseno fósil. Además, conservan la capacidad *drop-in* que tienen la mayoría de SAF, siendo igual de versátiles en ese aspecto. Otra gran ventaja que presentan es la independencia de biomasa, ya que no compiten con el uso alimentario de tierras ni con cadenas agrícolas, lo que mejora su sostenibilidad a largo plazo.

Su escalabilidad teórica es global, ya que la producción depende principalmente de electricidad renovable y CO₂, dos recursos ampliamente disponibles en un contexto de transición energética, siempre que el CO₂ provenga de fuentes biogénicas. Y es que es importante matizar que, bajo la regulación europea, no cualquier fuente de CO₂ es válida para producir e-SAF. El Reglamento Delegado (UE) 2023/1185 no distingue entre CO₂ biogénico y no biogénico de forma directa, sino que define qué fuentes pueden contabilizarse como emisiones evitadas para que el combustible cumpla el umbral de reducción de emisiones exigido. Se consideran elegibles entre otros el CO₂ biogénico procedente de biomasa sostenible, el CO₂ capturado directamente del aire (DAC), y, de forma transitoria, el CO₂ de origen industrial procedente de instalaciones sujetas al EU ETS, admitido únicamente hasta 2036 en el caso de la generación eléctrica y hasta 2041 para el resto de las industrias. Esta limitación implica que, a medio plazo, las únicas fuentes plenamente elegibles serán la biomasa sostenible y la captura directa de aire, lo que condiciona de forma relevante la disponibilidad y el coste del CO₂ necesario para la producción de combustibles sintéticos.

El despliegue de los e-fuels enfrenta todavía importantes desafíos técnicos y económicos, especialmente vinculados al coste de la electricidad renovable, la eficiencia de conversión global (actualmente inferior al 50 %), y la disponibilidad de CO₂ de alta pureza para la síntesis. Los costes actuales de producción de e-SAF se estiman entre 4 y 8 veces superiores al queroseno convencional (IEA, 2023), aunque se prevé una rápida reducción de precios a medida que los electrolizadores y las tecnologías de captura directa del aire alcancen economías de escala.

3.3 COMPARATIVA DE PROCESOS EXISTENTES

En la siguiente tabla se presentan las tecnologías existentes a modo de resumen:

Tabla 2: Resumen de las tecnologías SAF

Proceso	Feedstock	Madurez tecnológica	% Reducción emisiones	Complejidad proceso	Coste	Escalabilidad
HEFA	Aceites usados	Muy alta (TRL 9-10)	60-85%	Baja-media	Bajo	Media
ATJ	Alcoholes (etanol, isobutanol)	Media-alta (TRL 7-8)	50-80%	Media	Medio	Media-alta
FT	Biomasa (gasificación)	Media (TRL 7-8)	70-90%	Alta	Alto	Media
E-fuel	CO ₂ capturado + H ₂ verde	Baja (TRL5-6)	100%	Muy alta	Muy alto	Baja actualmente

Capítulo 4. EVALUACIÓN DE RUTAS PTL

Una vez analizado todo el entorno SAF, se pretende hacer un enfoque desde una perspectiva más técnica en las dos rutas PtL más prometedoras que se mencionaron anteriormente: MtJ y FT. Este es en definitiva el objetivo que marca la regulación europea, que es el de impulsar las rutas de SAF sintético al ser las más prometedoras para la total descarbonización del sector. Como se mencionó en el capítulo 4 de este trabajo, el reglamento *ReFuelEU Aviation* establece que para el año 2050 la mitad de todo el SAF sea de tipo PtL.

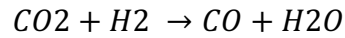
Estas dos rutas permiten transformar el hidrógeno renovable y el carbono capturado en hidrocarburos compatibles con el Jet A-1. En este capítulo, se van a evaluar ambas rutas para entender cuáles son las diferencias, las fortalezas y los inconvenientes de cada ruta.

4.1 ARQUITECTURA Y COMPLEJIDAD DE LOS PROCESOS

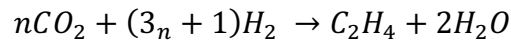
La arquitectura de los procesos es fundamental ya que condiciona de manera global el proceso y la inversión que va a ser necesaria dentro de estos. Aunque ambas rutas comparten el uso del hidrogeno renovable y captura de dióxido de carbono como materias primas básicas, la estructura de conversión presenta diferencias que justifican que se haga un análisis por separado.

4.1.1 ARQUITECTURA EN FT

Como se mencionó anteriormente, la ruta FT se basa en la fabricación de hidrocarburos a través del llamado gas de síntesis. Sin embargo, en la ruta PtL el carbono proviene fundamentalmente de CO₂ capturado, y por ello es necesario convertir el CO₂ a CO para poder conseguir el gas de síntesis. Esta conversión se realiza con la reacción conocida como “RWGS” (Reverse Water-Gas Shift). Esta conversión hace que el dióxido de carbono y el hidrógeno se convierten en monóxido de carbono y agua, que son fundamentales para la creación del gas de síntesis.



Ecuación 1: Reacción química RWGS



Ecuación 2: Ecuación simplificada del proceso FT

Esto implica una unidad adicional al sistema que penaliza energéticamente y añade complejidad tanto operativa como térmica.

Esta configuración del sistema FT requiere de añadir un bloque de mejora posterior, que incluye la parte final del proceso, de manera que se ajusta la distribución de productos y se pueda obtener una fracción adecuada para el combustible de aviación (Eyberg et al, 2024). El resultado conlleva un número elevado de unidades de proceso y una alta presión en su operación.

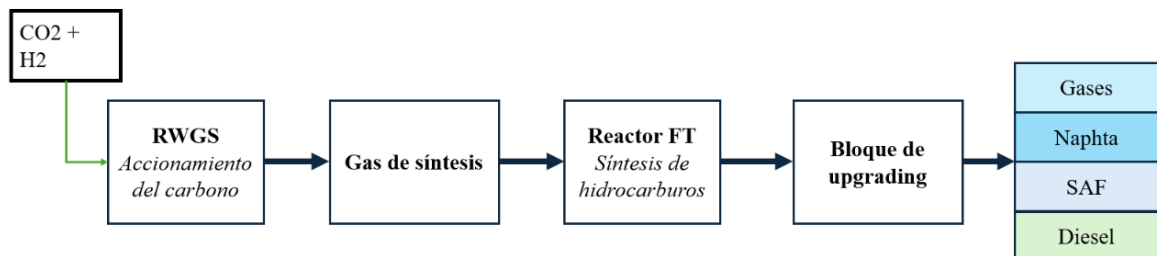
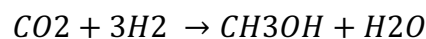


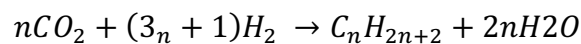
Ilustración 5: Diagrama simplificado de la arquitectura FT

4.1.2 ARQUITECTURA EN MTJ

La ruta de MtJ utiliza el metanol como intermediario químico. En este caso, el CO₂ capturado y el hidrógeno renovable se convierte en metanol sintético.



Ecuación 3: Reacción química del metanol



Ecuación 4: Reacción simplificada del proceso MtJ

El metanol actúa como un vector químico estable y en las plantas se puede desacoplar la unidad de hidrógeno si es necesario, facilitando su almacenamiento y su integración industrial.

La conversión posterior del metanol para conseguir el combustible sigue las fases de la ruta AtJ vista en el apartado 3.1.2. No obstante, a pesar de tener menos etapas en comparación con la ruta FT, no conlleva a una arquitectura más simple, debido a que utiliza un gran número de bombas y de compresores que hacen que el proceso tenga numerosos componentes y lo hace más caro. (Eyberg et al, 2024).

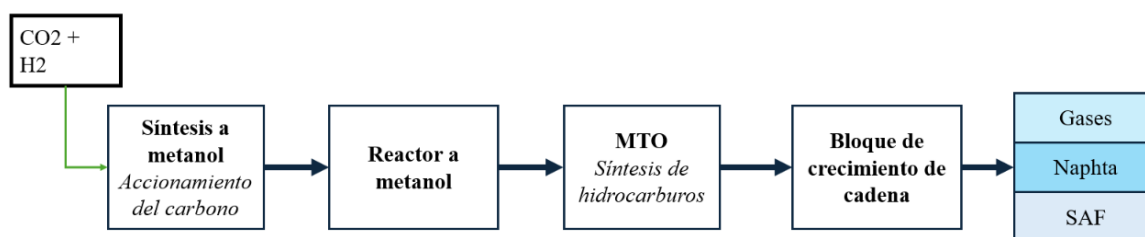


Ilustración 6: Diagrama simplificado de la arquitectura MtJ

4.2 EFICIENCIA DE USO DEL CARBONO

En las rutas de PtL, uno de los aspectos fundamentales que marcan su utilidad y atractivo es la eficiencia que presentan con el uso del carbono, ya que determina que fracción del carbono capturado se puede convertir eficientemente en combustible de aviación. Este parámetro es clave para el dimensionamiento de las unidades para capturar el CO₂ y sobre todo en los costes asociados de cada proceso, ya que el carbono que se necesita para estas rutas es escaso y su obtención es cara, por lo que una buena eficiencia es fundamental.

Es importante realizar un apunte en cuanto a la distinción de los conceptos de eficiencia: la eficiencia total de carbono a PtL y la eficiencia específica de carbono a fracción de queroseno (Bube et al, 2024). Es decir, un proceso puede tener una alta eficiencia global y sin embargo no presentar una conversión buena a queroseno, lo que dificulta su utilización en los

combustibles de aviación. Por mucho que se obtengan otros productos, que no necesariamente puedan ser utilizados para SAF, la ruta deja de ser tan útil para la descarbonización del sector.

4.2.1 EFICIENCIA EN LA RUTA FT

En la ruta FT, el carbono se introduce como CO_2 y se transforma con la reacción *RWGS*. De ahí se produce el gas de síntesis de la ruta, siguiendo el proceso FT que ya se ha mencionado anteriormente. La eficiencia total de conversión de carbono es muy elevada en torno al 98-99%, lo que pone de manifiesto la capacidad del proceso para transformar el carbono. No obstante, su eficiencia de carbono a fracción de queroseno es menor entre el 61-77% (Bube et al, 2024).

Esta diferencia entre las eficiencias implica que una parte importante del carbono se destina a productos que no son exactamente queroseno. Estos productos, que luego tienen un valor comercial (nafta, diésel...) no son aprovechados para la creación del SAF. Por tanto, para montar una planta de FT-PtL hay que tener en cuenta la valoración de estos subproductos en el mercado, o aumentar notablemente el tamaño de la planta, capturando así más CO_2 , para poder conseguir una cantidad elevada de combustible de aviación.

4.2.2 EFICIENCIA EN LA RUTA MTJ

En contraste, la ruta de MtJ funciona de forma completamente distinta en cuanto a eficiencia debido a que el metanol es el intermediario, lo que permite un mayor control de los productos finales que se consiguen. En este caso, el carbono se incorpora en la reacción previa entre el CO_2 y el hidrogeno renovable para producir el metanol. La eficiencia total del carbono se sitúa en el 74-92%, dependiendo especialmente en el tipo de reactor utilizado y las pérdidas por purgas y subproductos. La eficiencia de carbono a queroseno es del 60-92% (Bube et al, 2024).

Esta mayor eficiencia específica frente a la ruta FT es porque tiene una capacidad de seleccionar que producción se quiere en el proceso, y reducir la coproducción de productos no deseados. Sin embargo, es un proceso en general menos eficiente por las pérdidas en

ciertas unidades. Esto tiene implicaciones directas en el dimensionamiento de unidades de captura de CO₂ y en el coste de carbono por tonelada de combustible producido, lo que hace que la ruta MtJ sea menos competitiva económicamente en ciertos escenarios (Bube et al, 2024).

4.3 EFICIENCIA ENERGÉTICA Y REQUERIMIENTO DE H₂

A la hora de evaluar las rutas PtL, la eficiencia energética se vuelve vital, ya que estas rutas se basan en el uso intensivo de la electricidad renovable. Esta capacidad con la que poder convertir energía eléctrica en química para el combustible final es fundamental para la viabilidad ambiental y la competitividad económica de las diferentes rutas.

Este análisis debe englobar el sistema y proceso entero, desde la producción del hidrogeno hasta la obtención del queroseno, incluyendo todo tipo de pérdidas e ineficiencias que pueda haber por el camino. Hay que notar que la mayor parte del consumo energético en ambas rutas se produce en la electrolisis para producir el hidrógeno renovable, por tanto, una mayor eficiencia a H₂ conlleva una mejor eficiencia energética del proceso.

4.3.1 EFICIENCIA ENERGÉTICA Y REQUERIMIENTO DE H₂ EN LA RUTA FT

Como se ha ido mencionando a lo largo de todo este capítulo, la eficiencia de la ruta FT viene marcada por la unidad extra RWGS, que presenta una penalización energética muy relevante. Esto es debido a que se necesita un aporte energético adicional para que se produzca la reacción endotérmica para transformar el CO₂ capturado. Esto, sumado a las pérdidas inherentes de la electrolisis, reduce la eficiencia global. La eficiencia para producción de queroseno final se traduce en torno al 49% (Bube et al, 2024). No obstante, esta es mayor si se tiene en cuenta el resto de los productos que se producen, siendo un 67%. Por ello, aunque la ruta FT-PtL presenta una elevada eficiencia total de carbono, su requerimiento efectivo de hidrógeno por unidad de SAF puede verse penalizado por la necesidad de generar *syngas* y por la distribución de productos hacia fracciones distintas del SAF que se busca (Bube et al, 2024).

Esta elevada demanda eléctrica de la ruta FT se traduce a que el SAF producido es altamente sensible al precio de la electricidad renovable, sobre todo en escenarios de pequeña y mediana escala (Eyberg et al, 2024). Sin embargo, hay que notar que esta ruta presenta un potencial de mejora elevado dada la capacidad integración térmica avanzada y una operación a gran escala, lo que permite que se reduzcan parcialmente las pérdidas energéticas actuales.

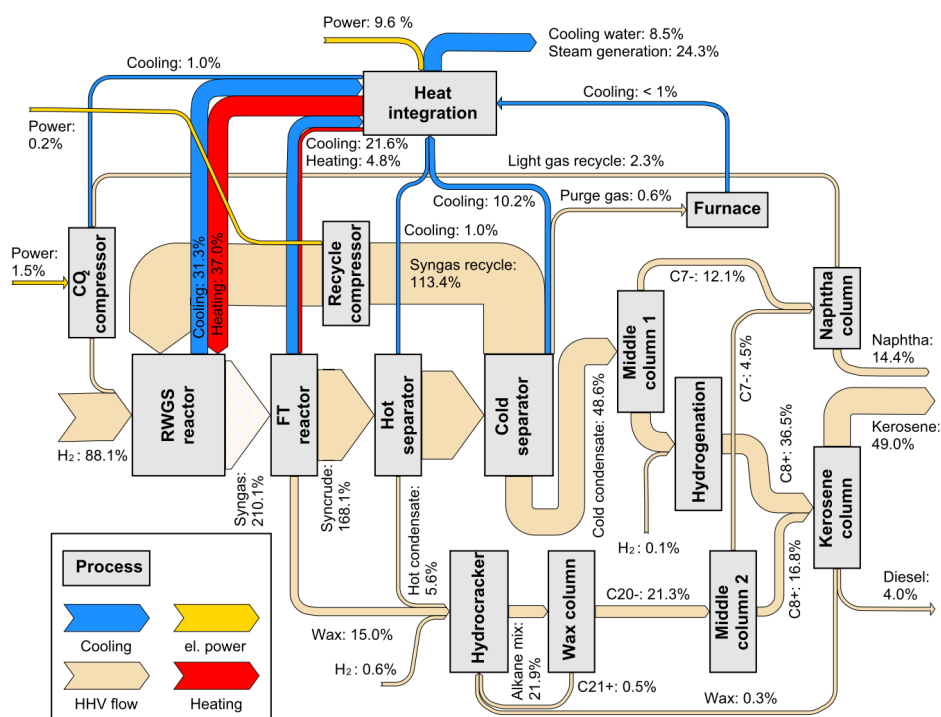


Ilustración 7: Diagrama de flujos de energía para la ruta FT (Bube et al, 2024)

4.3.2 EFICIENCIA ENERGÉTICA Y REQUERIMIENTO DE H₂ EN LA RUTA MTJ

La eficiencia energética en esta ruta se beneficia de la elevada madurez y selectividad que presenta la síntesis de metanol a través de CO₂ e hidrógeno, que se realiza de manera exotérmica sin necesidad de un aporte adicional de energía. Es por esto por lo que la eficiencia para producir queroseno es mayor que en la ruta FT, situándose en el 55% (Bube et al, 2024). Esta mejora en eficiencia se explica al usar menos unidades, y por poder seleccionar la cantidad de producto final que se necesita, lo que lo hace muy polivalente. Esta mejor eficiencia hacia la fracción queroseno reduce el consumo efectivo de hidrógeno

por kilogramo de SAF producido cuando se compara con FT, bajo hipótesis equivalentes de producto objetivo (Bube et al, 2024; Eyberg et al, 2024).

Además, presenta un menor grado de exposición a los precios de la energía renovable.

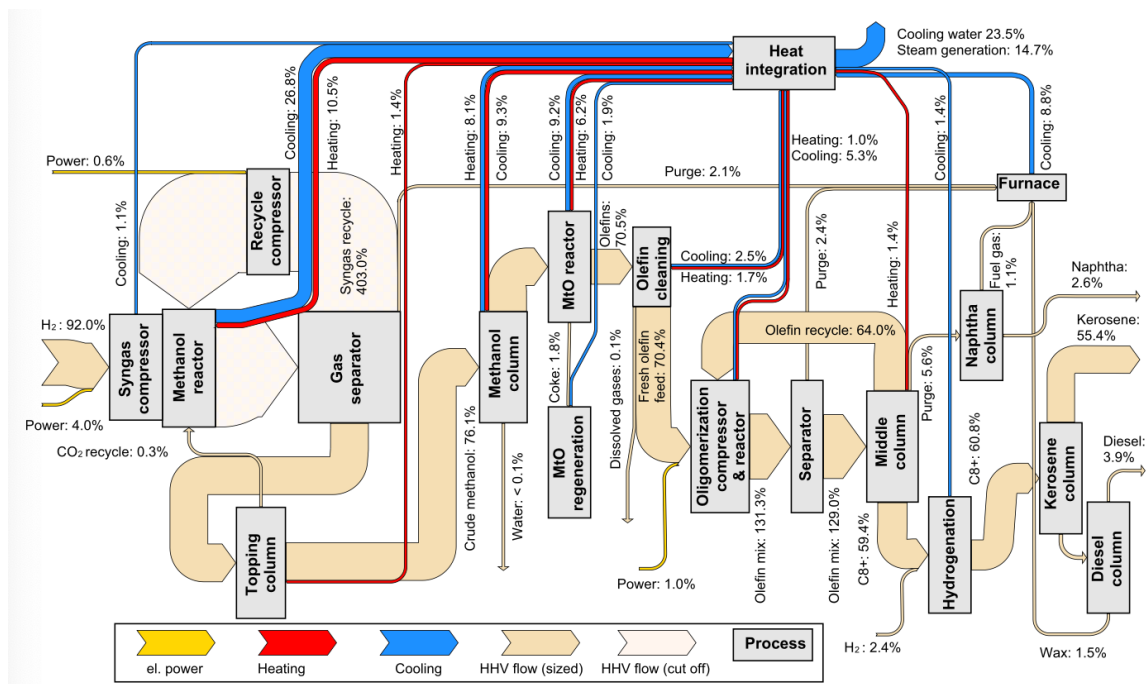


Ilustración 8: Diagrama de flujos de energía para la ruta metanol (Bube et al; 2024)

4.4 IMPLICACIONES ECONÓMICAS Y ESCALABILIDAD INDUSTRIAL

Las implicaciones económicas y su potencial escalabilidad son unos aspectos claves para la viabilidad real de cada ruta. Estas implicaciones son un reflejo de los apartados vistos anteriormente sobre arquitecturas y eficiencias técnicas, y determinan cual es el potencial de las rutas para conseguir el mejor SAF PtL. Ambas rutas están altamente influenciadas por el coste del hidrógeno renovable, que constituye el principal coste, pudiendo alcanzar hasta el 70% del total en la producción del SAF.

La ruta de FT viene caracterizada por ser menos intensiva en CAPEX en comparación con la ruta MtJ, dada su alta madurez industrial y el conocimiento que se tiene de la tecnología.

Desde el punto de vista operativo (OPEX), la menor eficiencia energética hace que se necesite una mayor demanda eléctrica y hace que esta ruta este muy expuesta al precio de electricidad renovable, y que se vea negativamente afectada si estos precios suben en sobremanera.

Sin embargo, al ser una tecnología madura y un proceso robusto y conocido, se reducen los riesgos tecnológicos y puede facilitar el acceso a financiación para proyectos.

La ruta MtJ presenta una mayor inversión debido al elevado número de unidades que se utilizan en el proceso y sus exigentes condiciones de funcionamiento. Es por esto, que la inversión es notablemente mayor que en la ruta FT. Sin embargo, esta gran inversión en CAPEX hace que esta ruta pueda ser interesante en cuanto a un comportamiento a gran escala, donde las economías de escala disponibles generen sinergias que permitirían reducir en gran medida coste unitario por combustible (Eyberg et al, 2024).

En cuanto al OPEX, al ser más eficiente energéticamente se traduce en una menor demanda eléctrica por unidad de combustible producido, siendo menos sensible al coste de la electricidad.

No obstante, la tecnología MtJ presenta incertidumbres en cuanto a la selectividad que se hace de los productos que se obtienen en esta ruta, lo que hace que sea muy sensible al control fino que se hace del proceso para poder maximizar la producción de queroseno, e implica que su escalabilidad actual sea menor.

En la siguiente tabla se presenta el resumen de la evaluación de las dos rutas:

Variable	FT	MtJ	Implicación
Etapas inicial	RWGS	Síntesis de metanol	FT requiere conversión previa de CO ₂ a CO

Intermediario principal	<i>Syngas</i>	Metanol	MTJ tiene un intermedio líquido comerciable
Madurez tecnológica	Mayor	Emergente	FT tiene menor riesgo tecnológico
Selectividad a SAF del carbono	Menor	Mayor	MTJ puede producir más SAF por unidad de carbono
Subproductos	Nafta, diésel, gases	Nafta, gases ligeros	Los subproductos reducen la fracción de carbono que se convierte en SAF
H ₂ eficiencia	Menor	Mayor	MTJ presenta una mejor eficiencia a SAF del H ₂ por su eficiencia energética
Escalabilidad	Experiencia	Eficiencia	FT tiene experiencia industrial, vs MtJ presenta mejor eficiencia a SAF
Inversión	Menor	Mayor	Aunque es más complejo FT, MtJ presenta muchas unidades en los procesos

Tabla 3: Tabla comparativa de las rutas PtL tratadas

Estas dos tecnologías presentan diferencias técnicas importantes a la hora de construir una planta, que implica que para diversos escenarios sea más favorable un caso u otro.

Una vez presentadas las dos tecnologías, se va a realizar un análisis cuantitativo detallado en el que se comprarán ambas tecnologías más en profundidad para determinar cuál de las dos es la más interesante. Esto se va a desarrollar en un modelo en Excel, que se presenta en el capítulo 5.

Capítulo 5. DESARROLLO DEL MODELO

En este capítulo se presenta el modelo económico que se ha desarrollado utilizando la herramienta Excel. Este modelo pretende comparar las dos tecnologías FT y MtJ desde un punto de vista económico, para ver que ruta puede ser más interesante.

5.1 DESCRIPCIÓN Y ALCANCE DEL MODELO

Para construir el modelo, se ha utilizado el método Lazard. Este es un método utilizado en Project Finance, mediante el cual se fijan el tamaño de la planta y el factor de carga que tiene, y después se calcula el precio de venta al que se ha de vender el combustible para una Tasa Interna de Rentabilidad (TIR) determinada.

En el siguiente diagrama se presenta de forma simplificada el funcionamiento del modelo. El modelo se basa en tres bloques, los cálculos base (que se encuentran en azul), que utilizan las hipótesis del modelo para establecer como es el funcionamiento de la planta. Después, los cálculos económicos (en morado), que sirven para construir las bases económicas del modelo y caracterizan las rutas por su impacto económico para poder calcular diferentes métricas que se utilizarán en el análisis. La tercera parte corresponde con los resultados (en verde en el diagrama), que son aquellas métricas con las que luego se va a realizar el análisis, y donde se ajusta iterativamente el precio de venta del SAF con la TIR objetivo explicada anteriormente.

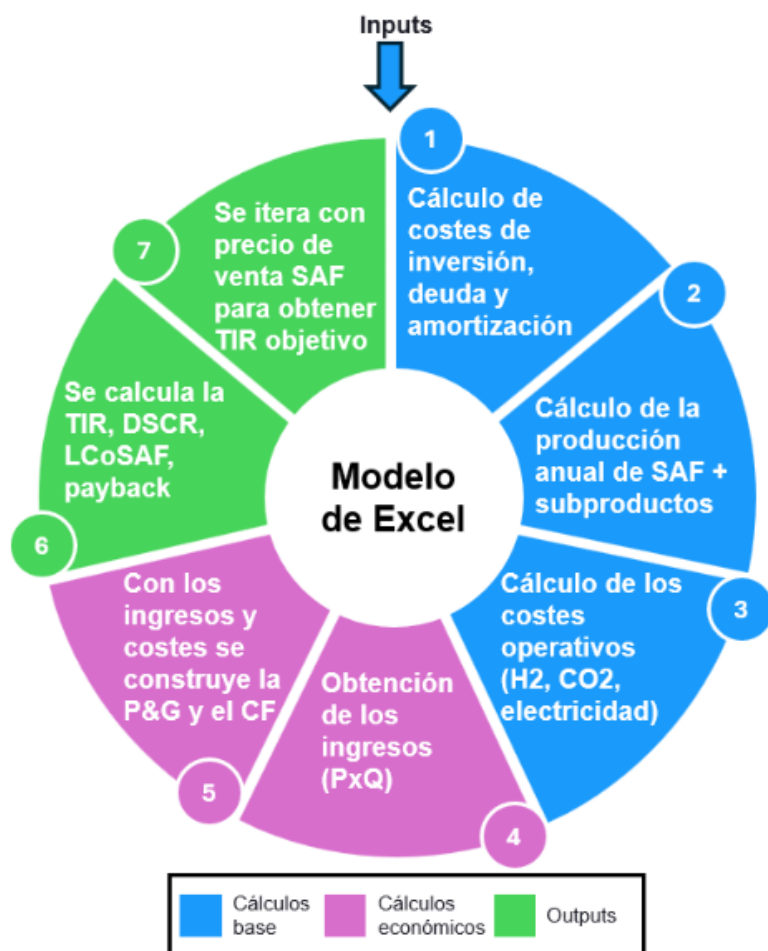


Ilustración 9: Flowchart de los procesos seguidos en el modelo Excel

Siguiendo las pautas del método de Lazard, se ha mantenido una TIR del accionista del 12%. Para ello, se han construido los correspondientes estados de la cuenta de pérdidas y ganancias, partiendo de la partida “Revenues” (ingresos), hasta el EBIT (“Earnings Before Interest and Taxes”). Este EBIT conecta con el estado de flujos de caja, a través del cual se obtiene el Flujo de Caja Libre (FCF), desde el cual se calcula finalmente la TIR. Para obtener los resultados se itera en Excel el precio del SAF para poder conseguir esta TIR del 12%. En el Anexo II se encuentran las capturas del modelo económico realizado en Excel.

El alcance se limita a la síntesis de combustible, donde el hidrógeno y el CO₂ se incorporan como materia prima a un precio dado, quedando fuera del alcance el electrolizador y la planta de captura de carbono. La estructura del modelo parte de los ingresos por venta de SAF y de

coproductos, de los que se descuentan los costes operativos (materias primas, electricidad y O&M) y la inversión (CAPEX), para obtener la cuenta de resultados, el flujo de caja libre y, mediante su descuento, la rentabilidad del proyecto. Los costes considerados son el CAPEX (inicial y de reinversión), el coste de hidrógeno, de CO₂, de electricidad y el O&M; los ingresos provienen de la venta de SAF y de la valorización de los coproductos (nafta y diésel).

5.2 HIPÓTESIS PLANTEADAS SOBRE LA PLANTA

El tamaño de la planta ideal a utilizar es de 100kt de producto al año. La planta estará funcionando durante 8000 horas y tendrá una vida útil de 25 años. Además, esta planta se ha planteado sin la parte de electrolisis y captura de carbono. Por tanto, se plantea que esta planta se encuentra en un rango suficiente (menos de 5km) de una fábrica de H₂ donde poder obtener el producto. Por otro lado, el CO₂ incluye también los costes de transporte desde su captura hasta la planta. Esta simplificación permite centrar el análisis en la comparación entre las rutas de MtJ y FT.

En cuanto a los consumos, para el H₂ se ha establecido un 10% superior al mínimo estequiométrico que se encuentra cercano al 0,45 t H₂ /tSAF. Por tanto, para MtJ como para FT el consumo de H₂ se ha establecido en 0,5 t H₂ /tproducto. Este valor se encuentra en línea con valores revisados en la literatura (Eyberg et al, 2024). En cuanto al valor del CO₂, se ha partido del mínimo estequiométrico teórico en ambas rutas, que son 3,16 t CO₂ /tSAF. A este valor se le ha aplicado un rendimiento de conversión de carbono a SAF, que sí que varía en cada ruta. En este caso, para MtJ se ha establecido una eficiencia a SAF de 76%, y en FT una eficiencia de 72% (Bube et al, 2024).

Para los precios del “feedstock” se han tomado precios de referencia en casos medios/conservadores para el caso base. Para el precio del H₂, se ha tomado el precio de marzo del 2026 de 7€/kg. Este precio está en línea con la estimación del Observatorio Europeo de Hidrógeno, con una media de 6,7 €/kg en el 2026. Para CO₂ se ha utilizado el precio de 120 €/t de dióxido de carbono biogénico. El precio se encuentra en la parte

conservadora del rango, ya que se incluye también el coste de purificación y transporte hasta la planta.

En cuanto al consumo eléctrico, se ha estimado un consumo de 1,2 kWh para la parte de MtJ y en 3kWh para la de FT. Esto está en línea con lo comentado anteriormente para ambas rutas SAF, con un mayor consumo en FT por la unidad extra *RWGS*. El precio de la electricidad se ha fijado en 75€/mWh.

En la siguiente tabla aparecen las hipótesis de la planta resumidas.

	MTJ	FT-PtL
Tamaño de planta (t)	100000	100000
Factor de carga (h)	8.000 año	8.000 año
Precio del H2 (€/kg)	7	7
Precio del CO2 (€/t)	120	120
Consumo H2 (kg H2/kg prod)	0,5	0,5
Consumo CO2 (tCO2/tSAF)	4,16	4,39
Rendimiento planta	85%	75%
Rendimiento CO2/SAF	76%	72%
Precio electricidad (€/MWh)	75	75
Consumo eléctrico (KWh/Kg SAF)	1,2	3

Tabla 4: Hipótesis de la planta

5.3 HIPÓTESIS PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL CAPEX

El CAPEX de la planta se ha estimado aplicando el factor de Williams, que es una metodología ampliamente utilizada en ingeniería de procesos para escalar inversiones cuando el coste no crece de forma proporcional a la capacidad instalada.

Como base de partida se ha tomado un CAPEX base de 800M€ para una planta de 250kt anuales de producto. Hay que tener en cuenta además que el CAPEX de las plantas estudiadas en el modelo no cuentan ni con electrolizador ni con planta de captura de carbono, por lo tanto, el impacto en el CAPEX es menor.

A partir de esta base, el factor de Williams permite reflejar las economías de escala asociadas al aumento de tamaño en la planta, ya que hay equipos, sistemas auxiliares, obra civil o

costes indirectos que no necesariamente tienen que duplicarse cuando se duplica la producción. Se ha seleccionado un exponente de 0,7 porque se sitúa dentro del rango habitual de plantas química y de proceso, pero con una hipótesis prudente frente al valor de 0,6 (más utilizado en términos generales), ya que una planta de SAF presenta una elevada complejidad tecnológica y de equipos.

En la siguiente tabla se hace un resumen de las hipótesis tomadas para el cálculo del CAPEX.

	MTJ	FT
CAPEX base (M€)	800	700
Tamaño base de la planta (t)	250.000	250.000
Factor de Williams	0,7	0,7

Tabla 5: Hipótesis para el CAPEX de la planta

La forma de cálculo del Capex obtenido a través del método de Williams ha sido la siguiente:

$$Capex\ Base\ (m€) * \left(\frac{Tamaño\ planta\ (t)}{Tamaño\ Base\ (t)} \right)^{FactorWilliams}$$

Ecuación 5: Fórmula de cálculo del CAPEX

5.4 HIPÓTESIS FINANCIERAS

El modelo propone una financiación con un D/E Ratio de 1,5, por tanto, con una financiación del CAPEX del 60% de deuda, de acuerdo con valores estándares de proyectos de infraestructuras. El tipo de interés escogido es del 5% con relación al tipo que suelen ofrecer los bancos para financiar inversiones. Se asume además una vida del préstamo de 10 años, con un tipo de deuda alemán, en el cual se pagan más intereses los primeros años y cuando avanza el tiempo menos, manteniendo el pago del principal constante.

La inflación se ha establecido un 2% en línea con modelos económicos revisados. El tipo impositivo utilizado es el del 25% del Impuesto de Sociedades en España. Por otro lado, se asume un CAPEX de re-inversión (tanto de mantenimiento como de crecimiento) que es del

3%, ya que la planta necesita un mantenimiento a lo largo del tiempo para el correcto funcionamiento de los equipos.

	MTJ	FT
Porcentaje de deuda	60%	60%
Tipo de interés	5%	5%
Vida préstamo (años)	10	10
Inflación	2%	2%
Impuesto de sociedades	25%	25%
Capex mantenimiento	3%	3%

Tabla 6: Hipótesis financieras del modelo

5.5 INDICADORES CALCULADOS Y CRITERIO DE INTERPRETACIÓN

Antes de presentar los resultados del modelo, es necesario definir los principales indicadores económicos utilizados, ya que no todos representan la misma perspectiva de análisis. En concreto, el modelo distingue entre indicadores de coste de producción, indicadores de precio requerido e indicadores de rentabilidad financiera. Esta distinción es relevante porque una misma planta puede analizarse desde la perspectiva del proyecto en su conjunto o desde la perspectiva del accionista que aporta capital propio.

En primer lugar, el modelo calcula la producción anual efectiva de SAF de cada ruta. Esta variable depende de la capacidad nominal considerada y del rendimiento de conversión hacia la fracción SAF. Por tanto, aunque ambas rutas partan de una capacidad de referencia comparable, la producción final puede ser distinta si una ruta convierte una mayor proporción de las materias primas en combustible de aviación.

El LCoSAF, o coste nivelado de producción de SAF, se utiliza como indicador del coste unitario medio de producción a lo largo de la vida útil de la planta. De forma simplificada, se calcula como el valor actual de los costes totales del proyecto dividido entre el valor actual de la producción total de SAF, ambos descontados con una tasa del 12%:

$$\left(\frac{\sum \text{Costes de la planta descontados}}{\sum \text{Producción anual de SAF descontada}} \right)$$

Ecuación 6: Fórmula del LCoSAF

Este indicador permite comparar cuánto cuesta producir una unidad de SAF en cada ruta bajo hipótesis homogéneas. En el modelo, el LCoSAF recoge los costes asociados al CAPEX, OPEX y demás costes considerados dentro del perímetro de análisis. Por ello, debe interpretarse como un indicador de coste unitario del proyecto.

Por otro lado, el precio de venta del SAF representa el precio al que debería venderse el combustible para alcanzar una determinada rentabilidad objetivo bajo la estructura financiera definida. En este trabajo, el precio de venta se calcula fijando una TIR objetivo para el accionista, que en el caso base del modelo es del 12%. Por tanto, este precio no es un coste técnico de producción, sino un precio requerido para que el inversor alcance la rentabilidad esperada.

La TIR del proyecto y la TIR del accionista no son equivalentes. La TIR del proyecto se calcula sobre los flujos de caja libres generados por la planta antes de considerar la estructura de financiación. Por tanto, mide la rentabilidad económica del activo en sí mismo, independientemente de cómo se financie. En cambio, la TIR del accionista, o TIR equity, se calcula sobre los flujos de caja que recibe el accionista una vez descontado el servicio de la deuda. Esta segunda métrica depende no solo de la rentabilidad operativa de la planta, sino también del nivel de apalancamiento, del coste de la deuda, del calendario de amortización y de la estructura fiscal, y es la que se fija en el modelo al 12%.

Por otro lado, el DSCR mide la capacidad del proyecto para atender el servicio de la deuda. Se calcula como el flujo de caja disponible para el servicio de la deuda dividido entre los pagos anuales de principal e intereses, manteniendo el caso base del modelo. Se calcula de la siguiente manera:

$$\frac{CFADS}{Total\ Servicio\ Deuda}$$

Ecuación 7: Fórmula del DCSR

Donde el CFADS se refiere al “*Cash Flow Available for Debt Service*”. Un DSCR superior a 1x indica que el proyecto genera caja suficiente para cubrir sus obligaciones financieras en ese año. En este trabajo se utiliza para evaluar si los flujos generados por cada ruta son compatibles con la estructura de financiación planteada.

Por último, se estudia el coste de abatimiento del CO₂ para entender el sobre coste de SAF por tonelada de CO₂ evitada:

$$\frac{\text{Coste SAF} - \text{Precio fósil}}{\text{Emisiones evitadas}}$$

Ecuación 8: Fórmula del coste de abatimiento

Capítulo 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados del modelo económico realizado. La forma de analizar será por bloques, viendo cómo se comporta cada ruta a las diferentes partes del modelo.

6.1 COMPARATIVA GENERAL

En la Tabla 7 se presentan los principales resultados del modelo económico para las rutas MtJ y FT. La interpretación de estos resultados debe realizarse teniendo en cuenta que no todos los indicadores tienen la misma función. La TIR equity se ha fijado como objetivo de rentabilidad del accionista, por lo que ambas rutas se calibran para alcanzar el 12%. Por este motivo, la TIR no es el indicador principal para decidir qué ruta es más competitiva, sino que debe analizarse junto con el precio de venta requerido, el LCoSAF, la producción anual de SAF, los consumos específicos y el CAPEX.

Bajo estas hipótesis, MtJ presenta una mejor posición relativa que FT, ya que obtiene una mayor producción anual de SAF y un menor LCoSAF. Esta ventaja no se debe a un menor CAPEX, ya que la inversión inicial de MTJ es superior, sino a una mayor eficiencia efectiva hacia la fracción SAF y a menores consumos específicos de materias primas por tonelada producida.

	MTJ	FT
Producción SAF (t)	77.626	68.493
TIR equity	12,0%	12,0%
Payback	12,00	12,00
Precio venta SAF	5.588	6.253
LCoSAF (euros/Kg SAF)	6,83 x	7,70 x
Feedstock costs (€m)	(358,37)	(355,71)
H2 efectivo (tH2/tSAF)	0,59	0,67
CO2 efectivo (tCO2/ tSAF)	4,16	4,39
CAPEX (€m)	395,3	345,9
DSCR	1,6x	1,6x

Tabla 7: Principales resultados generales del modelo

Analizando los resultados de la Tabla 7, destaca en primer lugar que la ruta MtJ consigue una mayor producción a SAF, alcanzando 77.626 toneladas frente a 68.493 de FT. Esto implica, que, aunque ambas plantas parten de una capacidad ideal comparable, MtJ es más eficiente para convertir la materia prima en combustible SAF final. Desde el punto de vista económico, esto implica que MtJ puede repartir los costes fijos y de inversión entre más toneladas de SAF, y por tanto hacer que baje el coste unitario en caso de que los costes no difieran mucho.

Además del SAF, ambas rutas generan una serie de subproductos asociados a la distribución de hidrocarburos obtenida en cada proceso. Se considera que la fracción objetivo es el SAF, mientras que las fracciones líquidas fuera de este rango pueden valorizarse como coproductos, principalmente nafta y diésel sintético (Bube et al, 2024). En el modelo económico se ha incorporado esta valorización de forma simplificada: en la ruta FT se considera que la fracción líquida no destinada a SAF se reparte entre diésel y nafta, con una ratio 2:1, utilizando precios de referencia de 700 €/t para el diésel y 600 €/t para nafta. En la ruta MtJ, la fracción líquida no SAF se valora a 700 €/t como combustible destilado equivalente. Los gases ligeros, purgas y otras corrientes menores no se consideran ingresos comerciales independientes, sino que se asumen como corrientes de bajo valor o aprovechables internamente para recuperación energética.

Desde la perspectiva general del método Lazard, ambas rutas alcanzan el objetivo de la TIR del 12%. El “payback”, o tiempo para conseguir recuperar la inversión inicial, también coincide en el año 12 de los 25 que tiene la planta, así que hacia la mitad para ambas rutas. Sin embargo, el precio obtenido de venta para cada ruta es distinto siendo el de MtJ de 5.588 €/tSAF y el de FT de 6.253 €/tSAF. Este mayor precio de venta para alcanzar la TIR viene dado por lo explicado anteriormente de la mejor eficiencia operativa que tiene MtJ.

Fijando ahora el punto de vista en el el LCoSAF de cada ruta, esto representa cuánto cuesta producir una unidad (kg de SAF) considerando todos los costes relevantes en el caso base de la planta. Para la ruta MtJ, este coste es de 6,83 €/kg SAF y el de FT es de 7,70 €/kg SAF.

Es decir, casi cuesta un euro más por cada kilogramo de SAF producido por el método FT. Este LCoSAF se ha realizado teniendo en cuenta el coste financiero asociado a la deuda considerada, lo que se denomina “*levered*”. El mayor conductor del coste del LCoSAF es la eficiencia que tiene la planta a SAF, y por tanto la producción total de combustible, y es por esto por lo que FT tiene mayor coste. La siguiente tabla refleja el desglose del cálculo de este LCoSAF:

	MTJ	FT
Coste total descontado en la planta (M€)	4.155,99	4.137,87
Producción total descontada en la planta (t)	608.828,15	537.201,31
LCoSAF (€/kg)	6,83	7,70

Tabla 8: Desglose del cálculo del LCoSAF

En la tabla se ve que a pesar de tener unos costes similares ambas rutas, la ruta FT-PtL empeora mucho cuando se tiene en cuenta toda la producción SAF total, porque es menos eficiente.

Atendiendo ahora al nivel de costes de SAF, se ha realizado un estudio de cuanto peso tiene cada coste dentro del LCoSAF de cada ruta. A continuación, se presenta un gráfico que resume este análisis:

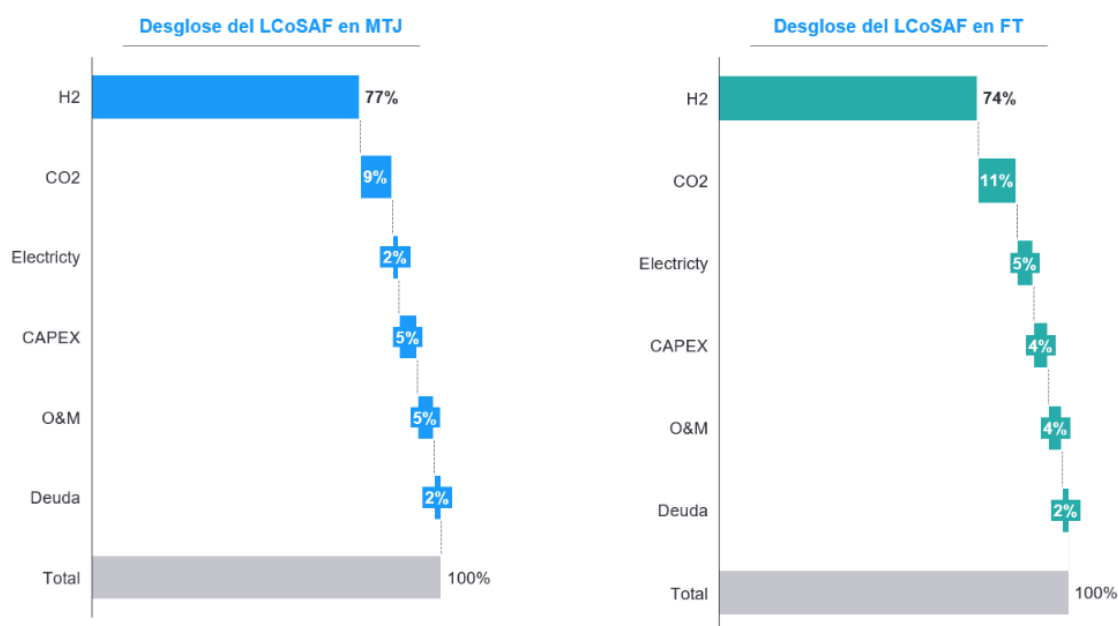


Ilustración 10: Gráfico con el desglose de costes del LCoSAF

Como se ve en el gráfico, para ambas rutas el mayor peso es el coste del H₂ que consume la planta, seguido del CO₂. Entre estos dos consumen casi el 90% de los costes unitarios de producción de SAF anuales. Por ello, se van a realizar una serie de análisis de sensibilidad con distintas variables para entender cómo se comporta cada ruta ante distintos casos.

6.2 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

6.2.1 ANÁLISIS DEL OPEX

Bajo las hipótesis del modelo estudiado, el OPEX es el principal elemento explicativo de la diferencia de ambas rutas. Bajo los supuestos del caso base, los costes de “feedstock” ascienden a 358,37 M€ en MtJ y a 355,71 M€ en FT. Se ha realizado una tabla de sensibilidad con distintos precios de “feedstock” para las dos rutas, de manera que se pueda caracterizar para distintos precios de ambas materias primas. El objetivo es entender como afectarían distintos precios de los componentes del “feedstock” a las rutas teniendo en cuenta que no consumen lo mismo, como se explicó en el capítulo anterior. En este caso se revisan como afectan los costes de la producción frente a cambios en el precio de las materias primas.

		Precio del H ₂ (€/kg)					
Precio del CO ₂ (€/t)	Costes (€M)	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0
	25	190,72	236,38	282,04	327,70	373,37	419,03
	50	198,79	244,45	290,11	335,77	381,43	427,10
	120	221,38	267,04	312,70	358,37	404,03	449,69
	200	247,20	292,86	338,52	384,19	429,85	475,51
	400	311,75	357,41	403,08	448,74	494,40	540,06
	800	440,86	486,52	532,18	577,84	623,50	669,17

Ilustración 11: Tabla de feedstocks para MtJ

		Precio del H ₂ (€/kg)					
Precio del CO ₂ (€/t)	Costes (M€)	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0
	25	190,16	235,83	281,49	327,15	372,81	418,47
	50	197,68	243,34	289,00	334,67	380,33	425,99
	120	218,72	264,38	310,05	355,71	401,37	447,03
	200	242,77	288,43	334,09	379,76	425,42	471,08
	400	302,89	348,55	394,22	439,88	485,54	531,20
	800	423,14	468,80	514,46	560,12	605,78	651,45

Ilustración 12: Tabla de precios de feedstocks para FT

Aunque la diferencia absoluta parece reducida, resulta muy significativa al tener en cuenta la producción de SAF de cada ruta. Como FT produce menos SAF tiene un mayor coste de materias primas por kg producido de SAF. Atendiendo ahora a la sensibilidad de cada ruta a las materias primas, es muy llamativa la dependencia del precio del hidrógeno. En escenarios en los que el hidrógeno está un 1€/kg más caro, el coste total aumenta entre un 12-13% en las dos rutas (manteniendo el mismo coste de CO₂). En comparación, el precio al que se tendría que vender el CO₂ para que aumentase un 12% el coste del “feedstock” es en torno a los 135€, es decir, es menos sensible el modelo a los cambios que ocurran en los precios del CO₂. Por ello, lo que va a dictar que la ruta sea más interesante en cuanto al tema costes va a ser la capacidad de mejorar su eficiencia al hidrógeno (consumir menos) para que sea menos sensible la planta a cambios en el precio de este.

Como se resume en la Tabla 4, el consumo efectivo de H₂ es menor en MtJ que en FT (Bube et al, 2024), como se ha recogido en el análisis de ambas rutas. Por ello, el LCoSAF de MtJ recoge esta mejor eficiencia por kg de SAF y mejora su coste comparado a FT-PtL. Además, el consumo de CO₂ a SAF también es más eficiente en MtJ, ya que a pesar de que FT recoge una eficiencia total de carbono muy alta, cercana al 100% (Bube et al, 2024), esto no se traslada directamente en SAF. Por eso, en cuanto a los costes del “feedstock”, la ruta MtJ presenta unas mejores eficiencias que hacen que se abaraten sus costes por unidad de combustible SAF producida.

Teniendo en cuenta cómo afecta el rendimiento de la planta y el precio del H₂ al LCoSAF:

		MTJ					
		Precio del H ₂ (€/kg)					
Rdto de la planta (%)	LCoSAF	4,0 €/kg	5,0 €/kg	6,0 €/kg	7,0 €/kg	8,0 €/kg	9,0 €/kg
70%		5,70	6,52	7,34	8,17	8,99	9,81
75%		5,36	6,12	6,89	7,66	8,43	9,20
80%		5,06	5,78	6,50	7,22	7,94	8,66
85%		4,79	5,47	6,15	6,83	7,50	8,18
90%		4,56	5,20	5,84	6,48	7,12	7,76
95%		4,35	4,96	5,56	6,17	6,77	7,38

Ilustración 13: LCoSAF en función del precio del H₂ y del rendimiento de la planta en MTJ

		Ft-PtL					
		Precio del H ₂ (€/kg)					
Rdto de la planta (%)	LCoSAF	4,0 €/kg	5,0 €/kg	6,0 €/kg	7,0 €/kg	8,0 €/kg	9,0 €/kg
70%		5,74	6,56	7,39	8,21	9,03	9,86
75%		5,40	6,17	6,93	7,70	8,47	9,24
80%		5,10	5,82	6,54	7,26	7,98	8,70
85%		4,83	5,51	6,19	6,87	7,55	8,22
90%		4,60	5,24	5,88	6,52	7,16	7,80
95%		4,39	5,00	5,60	6,21	6,82	7,42

Ilustración 14: LCoSAF en función del precio del H₂ y del rendimiento de la planta en FT

En el modelo se ha establecido que el coste del H₂ es idéntico para ambas rutas, e incluso que la ruta de MtJ tiene mayores costes de “feedstock” que FT. Por ello, la mejora que se aprecia en cuanto al coste nivelado de producción es debido a su mejor rendimiento en la planta. La ruta MtJ es capaz de producir una mayor cantidad de SAF, y por ello su coste nivelado en cuanto a kg SAF es menor. Esto hace que la ventaja competitiva de MtJ sea gracias a una mejor selectividad a SAF, y no tanto por un menor coste de las materias primas. Como se ve en las ilustraciones 13 y 14, a igualdad de rendimientos en la tabla, el LCoSAF es prácticamente el mismo.

6.2.2 ANÁLISIS DEL CAPEX

Tras haber analizado los costes del OPEX, se va a pasar a estudiar los costes fijos, o el CAPEX de cada planta. Esto es relevante, porque estas plantas requieren de un desembolso importante de dinero antes de empezar con su funcionamiento. En el caso de MtJ este asciende a 395M€, frente a los 345,9M€ de la planta de FT. El CAPEX en ambas rutas es menor que en otras configuraciones de plantas de SAF que se han estudiado en la revisión

de documentación. Esto es porque en las plantas del modelo no hay ni captura de carbono ni electrolisis, que suelen ocupar una parte relevante de la inversión en la planta.

El CAPEX en MtJ es más intensivo que en FT como se mencionó anteriormente, debido a la necesidad de tener más equipos en ciertas partes de la planta para que se genere el SAF. Sin embargo, este menor CAPEX en FT no se traduce en menor coste final de SAF como se ha visto antes. Y por eso MtJ compensa su mayor inversión mediante una mayor producción anual y ser operativamente más eficiente.

Para entender aún mejor la dependencia entre coste fijo y coste variable, se ha realizado un análisis de sensibilidad de la TIR (que en el caso base es del 12%) y del LCoSAF frente al precio del hidrógeno en comparativa con el CAPEX, manteniendo fijo el precio de venta de SAF del caso base.

MTJ						
Precio del H2 (€/kg)						
TIR	4,0 €/kg	5,0 €/kg	6,0 €/kg	7,0 €/kg	8,0 €/kg	
Coste del Capex (M€)						
276,5 M€	113%	82%	52%	24%	-1%	
335,75 M€	88%	63%	39%	17%	-6%	
395 M€	70%	49%	29%	12%	-11%	
454,25 M€	57%	39%	23%	8%	n.a.	
513,5 M€	48%	32%	18%	5%	n.a.	

Ilustración 15: TIR en función del precio del hidrógeno y CAPEX en MtJ

FT-PtL						
Precio del H2 (€/kg)						
TIR	4,0 €/kg	5,0 €/kg	6,0 €/kg	7,0 €/kg	8,0 €/kg	
Coste del Capex (M€)						
242 M€	126%	91%	56%	24%	-7%	
294 M€	98%	70%	42%	17%	-15%	
346 M€	79%	55%	32%	12%	n.a.	
398 M€	65%	44%	25%	8%	n.a.	
450 M€	54%	36%	20%	5%	n.a.	

Ilustración 16: TIR en función del precio del hidrógeno y CAPEX en FT-PtL

MTJ							
Precio del H2 (€/kg)							
LCoSAF	4,0 €/kg	5,0 €/kg	6,0 €/kg	7,0 €/kg	8,0 €/kg	9,0 €/kg	
Coste del Capex (M€)							
276,5 M€	4,38	5,05	5,73	6,41	7,09	7,76	
335,75 M€	4,58	5,26	5,94	6,62	7,29	7,97	
395 M€	4,79	5,47	6,15	6,83	7,50	8,18	
454,25 M€	5,00	5,68	6,36	7,03	7,71	8,39	
513,5 M€	5,21	5,89	6,56	7,24	7,92	8,60	

Ilustración 17: LCoSAF en función del precio de hidrógeno y CAPEX

		FT-PtL					
		Precio del H2 (€/kg)					
Coste del Capex (M€)	LCoSAF	4,0 €/kg	5,0 €/kg	6,0 €/kg	7,0 €/kg	8,0 €/kg	9,0 €/kg
	242 M€	4,99	5,75	6,52	7,29	8,06	8,83
	294 M€	5,19	5,96	6,73	7,50	8,26	9,03
	346 M€	5,40	6,17	6,94	7,70	8,47	9,24
	398 M€	5,61	6,37	7,14	7,91	8,68	9,45
	450 M€	5,81	6,58	7,35	8,12	8,88	9,65

Ilustración 18: LCoSAF en función del precio del H2 y CAPEX para FT

Como se ve en las tablas de arriba, el proyecto deja de ser rentable con valores de H₂ a partir de 8 €/kg, con niveles de CAPEX actuales. Es decir, la rentabilidad está muy ligada al precio que tenga el hidrógeno frente a la inversión que se tiene que realizar. Por ello, no tiene sentido escalar y embarcarse en proyectos de este tipo si el precio del hidrógeno esta encarecido, ya que, aun por la aplicación de economías de escala la rentabilidad pueda mejorar, se ve que en ambos casos la TIR y el coste nivelado son muy sensibles al precio del hidrógeno.

Por otro lado, el CAPEX no afecta en sobremanera a un coste nivelado mucho mayor, ya que el LCoSAF es menos sensible a estos cambios, por lo que en momentos en el los que el precio del hidrógeno se considere estable y barato tiene sentido hacer plantas a gran escala porque la producción de SAF teórica aumentaría.

6.2.3 ANÁLISIS DE LA DEUDA

También se ha realizado un análisis sobre la deuda en la cual se embarcarían los diferentes proyectos. Los supuestos financieros ya se explicaron en el capítulo anterior, y en este caso, la deuda está superpuesta al CAPEX que necesita la planta para poner funcionar. En ambos modelos se ha supuesto que la deuda supone el 60% del CAPEX. Para MtJ, al tener mayor CAPEX, la deuda supone 237,19 M€, y para FT supone 207,54M€.

El objetivo de este análisis es entender la financiación que se puede obtener en un proyecto de este tipo. La mejor manera de entender la capacidad de financiación del proyecto es a

través del DSCR. Esta métrica sirve para evaluar si las plantas son capaces de repagar sus obligaciones de deuda a través del flujo de caja que generan.

Al tener ambas plantas el mismo nivel de porcentaje de deuda sobre el CAPEX, se va a presentar en una misma tabla el comportamiento del DSCR para ambas rutas en función de sus principales componentes: el porcentaje de deuda y el tipo de interés.

		MTJ & FT-PtL					
		% deuda					
Tipo de interés (%)	DSCR	40%	50%	60%	70%	80%	90%
	2%	3,0x	2,4x	2,0x	1,7x	1,5x	1,3x
	3%	2,8x	2,2x	1,9x	1,6x	1,4x	1,2x
	4%	2,6x	2,1x	1,7x	1,5x	1,3x	1,1x
	5%	2,4x	1,9x	1,6x	1,4x	1,2x	1,1x
	6%	2,3x	1,8x	1,5x	1,3x	1,1x	1,0x
	7%	2,1x	1,7x	1,4x	1,2x	1,1x	0,9x

Ilustración 19: DSCR mínimo en función de % deuda y tipo de interés

Para el caso del modelo, ambas plantas obtienen un DSCR mínimo de 1,6x, que se encuentra por encima del ratio establecido en este tipo de plantas que es de 1,2x. El resultado obtenido refleja que los proyectos no deben ser financiados con un alto nivel de deuda, ya que, en casos con tipos de interés medio-alto, el DSCR min cae al límite exigido de 1,2x. En el caso del modelo, las plantas se podrían endeudar hasta un 70% del CAPEX y seguir obteniendo unos resultados de DSCR dentro de los límites razonables. El comportamiento ante la deuda es que cuanto más endeudamiento y mayor tipo de interés, peor cobertura de la deuda. Sin embargo, cabe un mayor nivel de endeudamiento frente a lo establecido en el caso base del modelo.

6.2.4 OTROS ANÁLISIS RELEVANTES

Es interesante entender cómo cambia el modelo también al factor de carga, ya que se ha asumido una operación de 8.000h. A continuación, se muestra un gráfico de como varía el LCoSAF frente al factor de carga:

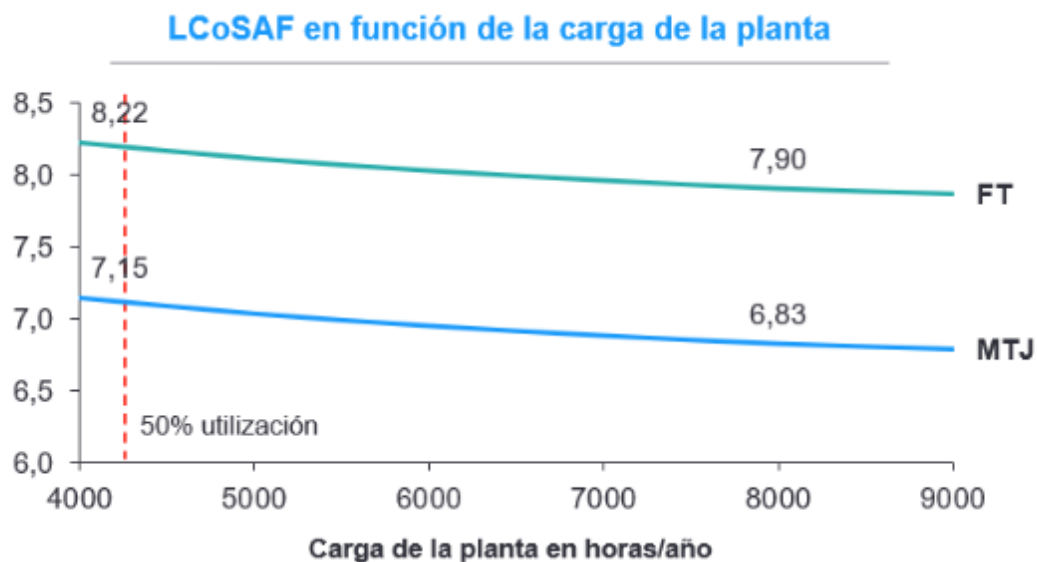


Ilustración 20: LCoSAF en función de la carga de la planta

Como se ve en el gráfico, la curva es bastante plana en cuanto al factor de carga. Es decir, el número de horas de operación de la planta no tiene un gran efecto sobre el coste de producción del combustible. De hecho, para una utilización de 4.000h (46%), el LCoSAF es únicamente un 4% superior al caso base que se propone en el modelo. Esto se entiende dentro del caso base del modelo en el que no se incluyen la electrólisis ni la captura de carbono, y que por lo tanto el coste dominante viene por la compra de materias primas.

No obstante, la operación sí que afecta en mayor medida a la rentabilidad de la planta. Cuanto menor son las horas de operación, la TIR disminuye y el precio de venta del SAF aumentan, ya que afecta directamente a la producción de SAF final.

Por otro lado, es interesante entender que factor juegan las economías de escala en los costes de producción por unidad que se estiman en el modelo. Como se mencionaba en el capítulo 4, esto puede ser una opción muy rentable en caso de que se puedan aplicar, ya que permitiría reducir costes y mejoraría la rentabilidad total de las plantas. Las plantas del modelo están modeladas para una capacidad ideal de 100kt de producto, pero si aplicasen las economías de escala, aumentar la producción ayudaría a reducir el coste de producción del SAF, haciendo más interesante su utilización como alternativa.

En el siguiente gráfico se presenta el LCoSAF en función de la capacidad de la planta:

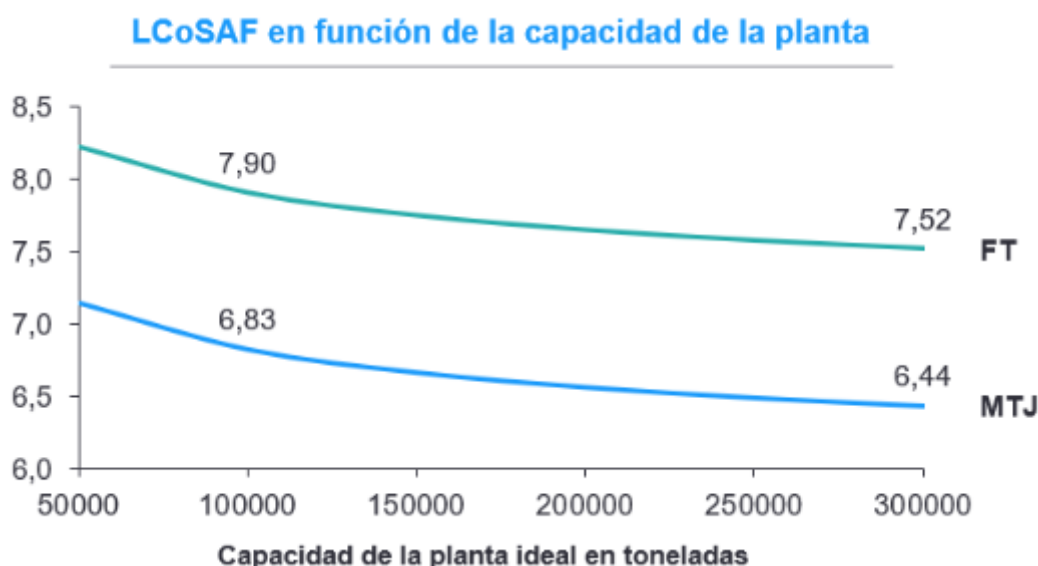


Ilustración 21: LCoSAF en función de la capacidad de la planta en caso ideal

Como se ve en el gráfico, las economías de escala sí que aplican ligeramente en este contexto, ya que se ve una reducción del LCoSAF del 5%. Es decir, a una mayor producción de SAF, el coste por unidad baja ligeramente manteniendo las condiciones del caso base.

Por último, a lo largo del trabajo se ha querido poner en valor la necesidad de una actuación conjunta de los organismos reguladores de la mano con los principales actores de la aviación para conseguir lograr el reto de la descarbonización del sector. En el siguiente gráfico se presentan los resultados del LCoSAF de ambas rutas de e-SAF frente al coste del queroseno estándar.

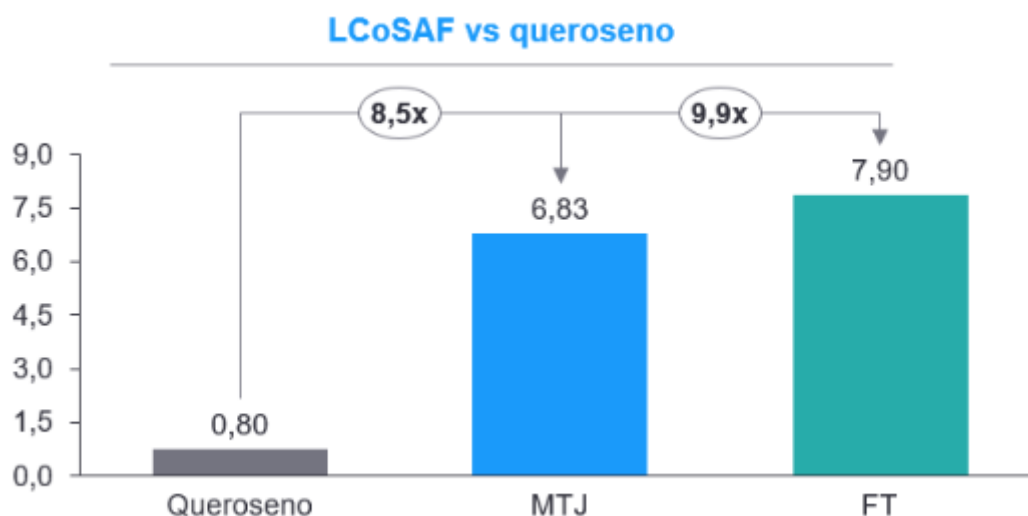


Ilustración 22: Gráfico LCoSAF vs queroseno fósil

Es evidente que las rutas actuales no son todavía lo suficientemente interesantes a nivel de costes para los productores de combustible, ya que se encuentran entre un 8,5-10x superiores en cuanto a €/kg que el queroseno fósil.

Esto también se ha querido analizar desde el punto de vista del coste de abatimiento del CO₂. Este coste se define como el sobrecoste de SAF por tonelada de CO₂ evitada respecto a combustible fósil. En este caso las emisiones evitadas equivalen al factor de combustión que se utiliza en el modelo de 3,16 t de CO₂ por t de SAF producido. Al ser ambas rutas e-SAF, las emisiones evitadas según el caso base ideal del modelo son ideales modeladas del 100%, por tanto, es todo el valor del factor de combustión. No obstante, este valor se trata de una métrica orientativa del modelo. Los resultados se muestran en la gráfica a continuación:

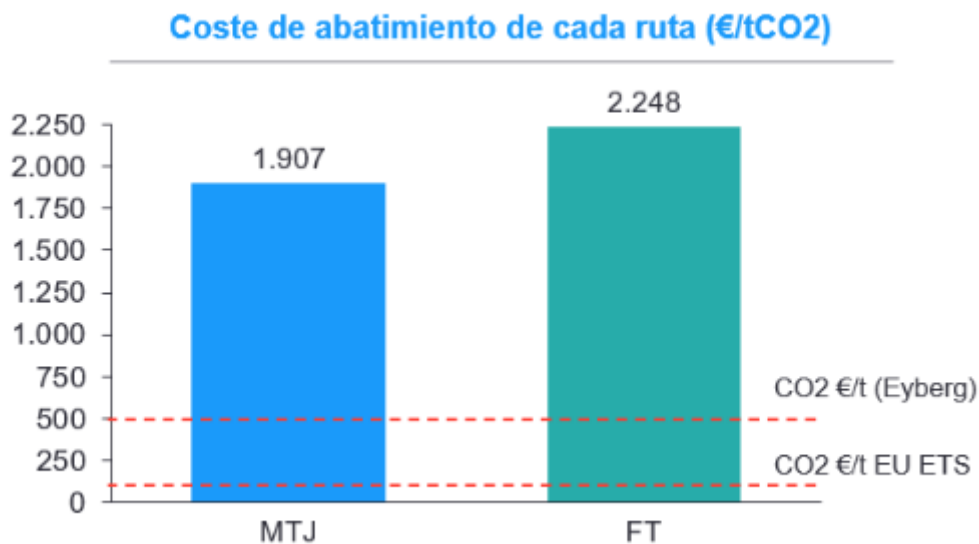


Ilustración 23: Coste de abatimiento de cada ruta en el modelo

Es decir, actualmente el coste de abatimiento que tienen ambas rutas es del orden de 24-28x el precio de emitir CO₂ que se paga en Europa. Es también significativamente mayor al precio que aparece de referencia de 500€/t en la literatura revisada (Eyberg et al, 2024).

Por tanto, la viabilidad de las rutas e-SAF depende de una regulación estricta, como es el caso del *ReFuelEU Aviation*, que regule su uso y obligue a los operadores a utilizar este tipo de tecnologías. También depende de un incentivo por parte de esta administración para que los operadores aéreos vean con buenos ojos una inversión en plantas de este tipo. Es un esfuerzo que ha de ser colectivo, ya que la descarbonización del sector de la aviación pasa por el alineamiento de los objetivos de todos los colectivos que se encuentran involucrados en el sector.

Capítulo 7. CONCLUSIONES

A lo largo de todo el trabajo se ha estudiado el papel que tienen los combustibles sostenibles de aviación o SAF en el proceso de descarbonización del sector aéreo. Como se ha mencionado anteriormente, el sector de la aviación tiene la gran dificultad que no es electrificable, además de otros factores como la gran densidad energética que tiene y la baja autonomía en los vuelos. Por ello, los SAF son la alternativa más interesante, dado que reducen en gran medida el impacto medioambiental que tiene el sector sin necesidad de hacer grandes cambios en la infraestructura ya existente en los aviones.

Dentro de este contexto, el trabajo ha tenido como objetivo evaluar desde una perspectiva técnico-económica dos de las rutas más prometedoras para la producción de SAF-PtL: MtJ y FT. Para ello se ha combinado una revisión de la literatura técnica y regulatoria con el desarrollo de un modelo financiero de proyecto en Excel que, fijados el tamaño de la planta y el factor de carga, calcula el precio de venta del SAF necesario para alcanzar una TIR objetivo fijada en el 12%. El alcance del modelo se ha limitado a la síntesis del SAF, incorporando el hidrógeno y el dióxido de carbono como insumos a un precio dado y dejando fuera el electrolizador y la captura de carbono de la planta.

De acuerdo con los resultados obtenidos, la ruta MtJ presenta una mejor posición económica contra la ruta FT en el caso base analizado para una TIR del 12%. A pesar de requerir un mayor CAPEX (395M€ vs 345M€), esto se compensa con una mayor producción de SAF alcanzando 77.626 toneladas frente a 68.493 de la ruta FT. Esta mayor producción permite diluir de mejor manera los costes fijos y compensa en mejor manera la inversión inicial. El principal indicador de la mejora económica de MtJ frente a FT es el coste nivelado de producción, donde el LCoSAF de MtJ se sitúa en 6,83€/kg frente a 7,70€/kg en FT. Por tanto, cuesta menos producir una unidad de SAF a través de la ruta de MtJ.

La conclusión de costes del trabajo establece que el coste del OPEX es el apartado más importante, aportando casi un 90% del total de los costes. Se ve claramente la dependencia

de ambas rutas en cuanto al precio del hidrógeno frente al del CO₂, y es menos sensible también del CAPEX que se haya incurrido en la planta. De hecho, el análisis realizado en el trabajo concluye que uno de los aspectos positivos de estas rutas es la capacidad que pueden tener de beneficiarse de economías de escala, reduciendo el coste nivelado de producción. Por ello, la conclusión en cuanto a costes es que en momentos de incertidumbre y volatilidad en el precio del H₂ la rentabilidad de las plantas se puede ver muy afectada. Y esto hace que sea muy relevante mejorar lo máximo posible la eficiencia a hidrógeno que tenga la ruta de e-SAF, para depender lo menos posible del precio del hidrógeno y maximizar las posibilidades de ser rentable.

No obstante, esta conclusión podría cambiar de forma relevante en un escenario en el que el CO₂ compatible se convirtiese en un recurso escaso y caro. La regulación europea solo reconoce como válidas determinadas fuentes de CO₂, y la captura sigue siendo cara, por lo que la disponibilidad de CO₂ cualificado podría convertirse en una restricción real al despliegue del e-SAF. En ese contexto, la ventaja se desplazaría hacia la ruta más eficiente en carbono. Aunque FT tiene muy pocas pérdidas de carbono en cuanto a producto, es menos eficiente en cuanto a producción de SAF frente a MtJ. Por eso, si el precio del CO₂ creciera en sobremanera debido a una escasez del producto, se ampliaría la ventaja económica de MtJ. Por tanto, en un futuro de CO₂ escaso, la eficiencia de carbono a queroseno dejaría de ser un factor secundario para convertirse en un criterio estratégico, y asegurar el suministro de CO₂ cualificado sería tan crítico como el propio coste del hidrógeno.

La principal conclusión del modelo es que la ruta MtJ aparece como la ruta más competitiva e interesante desde un punto de vista económico, debido al menor LCoSAF, mayor producción de SAF y mejor eficiencia operativa. No obstante, esta conclusión es sacada a través del caso base estudiado en el que no se tienen en cuenta ni la electrólisis ni la captura de carbono, y en el que se asume una equivalencia regulatoria en las rutas. Y es que esta es uno de los principales inconvenientes de MtJ, que su situación normativa se encuentra en evolución. Por eso, la ruta FT resulta muy interesante porque a pesar de penalizar en un mayor coste por kg de SAF producido, y una menor producción total; ya se encuentra en disposición de ser producida y utilizada. Por eso, el desarrollo de la planta tiene que ir ligado

al debate que tengan los productores de SAF: ¿Apoyarse en madurez tecnológica para empezar a desarrollar e-SAF, o apostar por una ruta mucho menos preparada tecnológicamente, pero que se presenta como más eficiente en cuanto nivel de producción y coste marginal?

En cualquier caso, ninguna de las dos rutas es hoy competitiva frente al queroseno fósil, por lo que su viabilidad depende de forma crítica de un marco regulatorio exigente, como el mandato *ReFuelEU Aviation*, y de incentivos que hagan atractiva la inversión, así como del abaratamiento esperado del hidrógeno verde. La descarbonización del transporte aéreo exige, en definitiva, un esfuerzo colectivo y coordinado entre reguladores, productores de combustible y operadores aéreos, cuyos objetivos deben estar alineados para hacer viable la transición.

7.1 LIMITACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

La principal limitación del modelo trabajado es la exclusión del electrolizador y de la captura del dióxido de carbono en la planta. Aunque se ha hecho con la intención de centrar el análisis en la comparativa entre MtJ y FT, reduce la representabilidad de los resultados frente a una planta PtL totalmente integrada. En los estudios revisados en la literatura sí que se tienen en cuenta estos dos elementos en la planta, y donde se ha visto que dominan el apartado de la inversión. Por ello, el CAPEX incurrido sería bastante mayor.

Otra limitación encontrada es el factor de carga optimista de 8.000h utilizado en el modelo, ya que la garantía de suministro renovable es una condición crítica de viabilidad y es un caso optimista pensar que una planta de e-SAF puede estar funcionando a un factor de carga del 91%.

En cuanto a las líneas de trabajo futuras, se propone en primer lugar integrar en el modelo la electrólisis y la captura de carbono, de manera que se puedan comparar ambas opciones y determinar en qué casos implementar ambas unidades, y en qué casos dejarlo como en el

modelo original. Además, la inclusión de estas unidades permitiría evaluar no solo el impacto económico, sino también toda su influencia en el impacto energético global.

Otra línea de trabajo futura sería desarrollar un modelo que se centre más en los balances de masa y energía. En el presente trabajo se han basado en datos encontrados en la literatura, pero sería interesante incorporar la distribución de otros productos, las corrientes de purga o como aprovechar el calor residual para darle un mejor uso a la planta.

Por último, es necesario ir actualizando el modelo bajo diferentes escenarios de cumplimiento normativo. La evolución a futuro que pueda tener el mercado SAF en los siguientes años a través de reglamentos como el *ReFuelEU Aviation*; o la certificación de nuevas rutas SAF, hace que se puedan modificar de forma relevante la viabilidad que presentan estos proyectos.

Capítulo 8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] International Civil aviation Organization. (ICAO). (2025). *CORSIA Sustainability Criteria for CORSIA Eligible Fuels*, ICAO <https://www.icao.int/sites/default/files/environmental-protection/CORSIA/Documents/CORSIA%20Eligible%20Fuels/ICAO-document-05-Sustainability-Criteria-June-2025.pdf>
- [2] ASTM International. (2024). *ASTM D1655: Standard Specification for Aviation Turbine Fuel*. ASTM International. [D1655 Standard Specification for Aviation Turbine Fuels](#)
- [3] ASTM International. (2024). *ASTM 7566: Standard Specification for Aviation Turbine Fuels containing Synthesized Hydrocarbons*. ASTM International. [D7566 Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons](#)
- [4] ASTM International. (2024). *ASTM D4054: Standard Practice for Qualification and Approval of New Aviation Turbine Fuels*. ASTM International. [D4054 Standard Practice for Evaluation of New Aviation Turbine Fuels and Fuel Additives](#)
- [5] European Commission. (2026). *Reducing emissions from aviation*. Climate Action. https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport-decarbonisation/reducing-emissions-aviation_en
- [6] European Commission. (n.d.) *Renewable energy directive: Targets and rules (RED II)*. [DIRECTIVA \(UE\) 2018/ 2001 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO - de 11 de diciembre de 2018 - relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables](#)
- [7] Confederación Española de Organizaciones Empresariales. (2022). *Claves del paquete Fit for 55*. CEOE. [2203_ceoe_claves-paquete-fit-for-55.pdf](#)
- [8] European Union. (2023). *Regulation (EU) 2023/2405 of the European Parliament and of the Council of 18 October 2023 on ensuring a level playing field for sustainable air transport (ReFuelEU Aviation)*. Official Journal of the European Union. [Regulation - EU - 2023/2405 - EN - EUR-Lex](#)
- [9] BBC News Mundo. (2019). *Qué es el tankering*. BBC. [Qué es el "tankering", la contaminante práctica que utilizan algunas aerolíneas para ahorrar dinero - BBC News Mundo](#)

- [10] International Air Transport Association (IATA). (n.d.) *Sustainable aviation fuel (SAF)*. IATA [IATA - Sustainable Aviation Fuel \(SAF\)](#)
- [11] International Air Transport Association (IATA). (2024). *SAF handbook*. IATA. [SAF Handbook](#)
- [12] Detsios N, Theodoraki S, Maragoudaki L, Atsonios K, Grammelis P, Orfanoudakis NG. (2023) *Recent Advances on Alternative Aviation Fuels/Pathways: A Critical Review*. Energies. <https://doi.org/10.3390/en16041904>
- [13] Netherlands Aerospace Centre (NLR). (2021). *Sustainable aviation fuel state of industry report: Hydroprocessed esters and fatty acids pathway*. Netherlands Aerospace Centre [Sustainable Aviation Fuel State-of-Industry Report: Hydroprocessed Esters and Fatty Acids Pathway - National Laboratory of the Rockies](#)
- [14] Bioeconomía.info. (2025). *Hondajet completa un vuelo utilizando 100% SAF*. Bioeconomía.info [HondaJet vuela por primera vez con 100% SAF y marca un hito en aviación ejecutiva - BioEconomia.info](#)
- [15] IEA Bioenergy Task 39 (2024). *Sustainable Aviation Fuels: Status, Challenges and Opportunities*. IEA Bioenergy. [IEA-Bioenergy-Task-39-SAF-report.pdf](#)
- [16] Neste (n.d.) *Sustainable aviation fuel*. Neste. [Neste Impact | Neste](#)
- [17] World Energy (n.d.) *Sustainable aviation fuel solutions*. World Energy. [See the Difference Our Sustainable Aviation Fuel Can Make | World Energy](#)
- [18] LanzaJet. (n.d.). *LanzaJet* [LanzaJet | LanzaJet | Home](#)
- [19] Gevo. (n.d.). *ATJ-30 project*. Gevo. [Gevo ATJ-30 Project: Renewable Fuels and Carbon Abatement](#)
- [20] Joint Inspection Group (JIG). (2023). *DEF STAN 91-091 Issue 18*. JIG. [DefStan 91-091 Issue 18 - Joint Inspection Group](#)
- [21] Velocys. (n.d.). *Velocys*. [Home | Velocys](#)
- [22] Sunfire. (2023). *Breakthrough for Power-to-X: Sunfire puts first co-electrolysis into operation and starts scaling*. Sunfire. [Breakthrough for Power-to-X: Sunfire puts first co-electrolysis into operation and starts scaling | Sunfire](#)
- [23] Comisión Europea. (2023). *Reglamento Delegado (UE) 2023/1185 de la Comisión, de 10 de febrero de 2023, por el que se completa la Directiva (UE) 2018/2001 estableciendo un umbral mínimo de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero para los combustibles de carbono reciclado y especificando una metodología para evaluar la reducción de emisiones de los carburantes renovables líquidos y gaseosos de origen no*

- biológico y de los combustibles de carbono reciclado*. Boletín Oficial del Estado.
<https://www.boe.es/doue/2023/157/L00020-00033.pdf>
- [24] International Energy Agency (IEA). (2023). *World Energy Outlook 2023*. IEA [World Energy Outlook 2023 – Analysis - IEA](#)
- [25] Bube, S., Bullerdiek, N., Voß, S., & Kaltschmitt, M. (2024). *Kerosene production from power-based syngas – A technical comparison of the Fischer-Tropsch and methanol pathway*. Fuel (London, England), 366(131269), 131269.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.131269>
- [26] Eyberg, V., Dieterich, V., Bastek, S., Dossow, M., Spliethoff, H., & Fendt, S. (2024). *Techno-economic assessment and comparison of Fischer–Tropsch and Methanol-to-Jet processes to produce sustainable aviation fuel via Power-to-Liquid*. Energy Conversion and Management, 315(118728), 118728. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118728>
- [27] Damodaran, A. (2026) *Betas by sector (US)*. New York University, Stern School of Business. [Betas](#)

ANEXO I

Corsia criterio de sostenibilidad para SAF. Fuente de: CORSIA Sustainability Criteria for CORSIA Eligible Fuels.

Tema	Principio	Criterios
1. Gases de efecto invernadero (GEI)	El SAF CORSIA debe generar menores emisiones de carbono considerando todo el ciclo de vida.	Criterio 1.1: debe lograr una reducción neta de emisiones GEI de al menos el 10% frente al valor base de emisiones de ciclo de vida del combustible de aviación.
2. Reservas de carbono	El SAF CORSIA no debe producirse a partir de biomasa obtenida de tierras o ecosistemas acuáticos con elevadas reservas de carbono biogénico.	Criterio 2.1: excluye biomasa de áreas convertidas después del 1 de enero de 2008, como bosques primarios, humedales, turberas, arrecifes de coral, bosques de kelp, praderas marinas, estuarios, marismas mareales o manglares. También excluye biomasa que degrade dichas reservas de carbono. Criterio 2.2: si existe conversión de uso del suelo posterior al 1 de enero de 2008, deben calcularse las emisiones directas por cambio de uso del suelo (DLUC). Si estas superan el valor ILUC por defecto, se sustituye el ILUC por el DLUC.
3. Permanencia de la reducción de emisiones GEI	Las reducciones de emisiones atribuidas al SAF CORSIA deben ser permanentes.	Criterio 3.1: deben aplicarse prácticas operativas para monitorizar, mitigar y compensar cualquier incidencia material de no permanencia asociada a actividades de captura y almacenamiento de carbono (CCS).
4. Agua	La producción de SAF CORSIA debe mantener o mejorar la calidad y disponibilidad del agua.	Criterio 4.1: deben implementarse prácticas operativas para mantener o mejorar la calidad del agua. Criterio 4.2: deben aplicarse prácticas de uso eficiente del agua y evitar el agotamiento de recursos superficiales o subterráneos por encima de su capacidad de reposición.
5. Suelo	La producción de SAF CORSIA debe mantener o mejorar la salud del suelo.	Criterio 5.1: en la producción de materias primas o recogida de residuos agrícolas y forestales deben aplicarse buenas prácticas de gestión para mantener o mejorar las condiciones físicas, químicas y biológicas del suelo.

Tema	Principio	Criterios
6. Aire	La producción de SAF CORSIA debe minimizar los efectos negativos sobre la calidad del aire.	Criterio 6.1: deben limitarse las emisiones contaminantes al aire.
7. Conservación	La producción de SAF CORSIA debe mantener la biodiversidad, el valor de conservación y los servicios ecosistémicos.	Criterio 7.1: no debe usarse biomasa procedente de áreas protegidas por su biodiversidad, valor de conservación o servicios ecosistémicos, salvo evidencia de que la actividad no interfiere con los fines de protección. Criterio 7.2: deben seleccionarse materias primas de bajo riesgo invasor y adoptarse controles para evitar la dispersión no controlada de especies exóticas cultivadas y microorganismos modificados. Criterio 7.3: deben aplicarse prácticas operativas para evitar impactos adversos en áreas protegidas.
8. Residuos y productos químicos	La producción de SAF CORSIA debe promover una gestión responsable de residuos y productos químicos.	Criterio 8.1: los residuos de producción y los químicos utilizados deben almacenarse, manejarse y eliminarse de forma responsable. Criterio 8.2: deben aplicarse prácticas responsables y basadas en criterios científicos para limitar o reducir el uso de pesticidas. Criterio 8.3: deben aplicarse prácticas para prevenir, minimizar y mitigar daños por liberaciones accidentales de recursos fósiles, productos combustibles u otros químicos.
9. Impactos sísmicos y vibracionales	La producción de SAF CORSIA debe minimizar impactos sísmicos, acústicos y vibracionales asociados al CCS.	Criterio 9.1: deben aplicarse prácticas operativas para minimizar impactos sísmicos relacionados con actividades de superficie, subsuelo y submarinas. Criterio 9.2: deben aplicarse prácticas para minimizar impactos acústicos y vibracionales en actividades de superficie, subsuelo y submarinas.
10. Derechos humanos y laborales	La producción de SAF CORSIA debe respetar los derechos humanos y laborales.	Criterio 10.1: la producción de SAF CORSIA debe respetar los derechos humanos y laborales.
11. Derechos de uso de la tierra y uso del suelo	La producción de SAF CORSIA debe respetar los derechos sobre la tierra y los	Criterio 11.1: deben respetarse los derechos existentes sobre la tierra y su uso, tanto formales como informales, incluidos los derechos de pueblos indígenas.

Tema	Principio	Criterios
	derechos de uso, incluidos derechos indígenas y/o consuetudinarios.	
12. Derechos de uso del agua	La producción de SAF CORSIA debe respetar derechos previos, formales o consuetudinarios, de uso del agua.	Criterio 12.1: deben respetarse los derechos existentes de uso del agua de comunidades locales e indígenas.
13. Desarrollo local y social	La producción de SAF CORSIA debe contribuir al desarrollo social y económico en regiones con pobreza.	Criterio 13.1: en regiones de pobreza, la producción de SAF CORSIA debe procurar mejorar las condiciones socioeconómicas de las comunidades afectadas por la operación.
14. Seguridad alimentaria	La producción de SAF CORSIA debe promover la seguridad alimentaria en regiones con inseguridad alimentaria.	Criterio 14.1: en regiones con inseguridad alimentaria, la producción de SAF CORSIA debe procurar mejorar la seguridad alimentaria local de los grupos directamente afectados.

ANEXO II

Inputs (año)	
Tamaño planta (t)	91324
H2 requerido (tH2)	0,50
CO2 requerido (t)	4,16
Electricidad (KWh)	1,2
CO2 biogenico (t)	120
Factor de carga	8000
Producción ideal	100000
Horas en condici	8760

Producciones	
H2 (t)	45.662
CO2 (t)	322.759
Electricidad (Mwh)	109.589

16%

Descuentos	
vida planta (años)	25
precio electricidad (€/MWh)	75
precio H2 (€/kg)	7
Diesel (€/t)	700

Consumos	
CO2 a SAF	76%
Planta	85%

Cálculo del Capex	
Factor de William	0,7
Capex Base (M€)	800
Capacidad Base	250000
CAPEX (M€)	395

Calculo del DCF

Precio SAF (€/tSAF)	5.588,21
TIR objetivo	12,00%
D/E Ratio	1,5
Interest rate	5%
Tax rate	25%
Vida préstamo	10
%CAPEX mantener	3,0%
Inflación	2,0%
Growth rate perpetuo	1,5%
O&M Factor	5%
% deuda	60%
Enterprise value	0,03
1000000	

	2026	¹ 2027	² 2028	³ 2029	⁴ 2030	⁵ 2031	⁶ 2032	⁷ 2033	⁸ 2034	⁹ 2035
EBIT		41,21	42,35	43,52	44,70	45,91	47,15	48,41	49,69	51,00
D&A		15,81	15,81	15,81	15,81	15,81	15,81	15,81	15,81	15,81
CAPEX	(395,31)	(11,86)	(11,86)	(11,86)	(11,86)	(11,86)	(11,86)	(11,86)	(11,86)	(11,86)
Debt	237,19	(23,7)	(23,7)	(23,7)	(23,7)	(23,7)	(23,7)	(23,7)	(23,7)	(23,7)
Interest		(11,9)	(10,7)	(9,5)	(8,3)	(7,1)	(5,9)	(4,7)	(3,6)	(2,4)
Taxes		(7,34)	(7,92)	(8,51)	(9,10)	(9,70)	(10,30)	(10,92)	(11,53)	(12,16)
FCF	(158,13)	2,25	3,99	5,76	7,54	9,33	11,15	12,98	14,84	16,71
FCF+ TV	(158,13)	2	3,99	5,76	7,54	9,33	11,15	12,98	14,84	16,71
Discount factor	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
DCF	(158,13)	2,01	3,18	4,10	4,79	5,30	5,65	5,87	5,99	6,02
FCF cumulative	(158,13)	(155,88)	(151,88)	(146,12)	(138,59)	(129,26)	(118,11)	(105,12)	(90,29)	(73,58)
DCF cumulative	(158,13)	(156,12)	(152,93)	(148,83)	(144,05)	(138,75)	(133,10)	(127,23)	(121,24)	(115,21)

Pestaña del modelo relevante en cuanto a los inputs y el cálculo del DCF para MtJ.

Inputs (año)		Producciones		Descuentos		Consumos		Cálculo del Capex	
Producción anual (t)	91324	H2 (t)	45.662	vida planta (años)	25	CO2 a SAF	72%	Factor de William	0,7
H2 requerido (tH2/t producto)	0,50	CO2 (t)	300.609	precio electricidad (€/MWh)	75	Planta	75%	Capex Base (M€)	700
CO2 requerido (tCO2/tSAF)	4,39	Electricidad (Mwh)	273.973	precio H2 (€/kg)	7			Capacidad Base	250000
Electricidad (KWh/kgSAF)	3	Consume más electricidad por RWGS		Diesel (€/t)	700			CAPEX	346
CO2 (€/tCO2)	120			Naphta (€/t)	600				
Factor de carga	8000			Die/naph ratio	2				
Producción ideal (t)	100000								
Horas en condiciones ideales	8760								

Cálculo del DCF											
Precio SAF (€/tSAF)	6.253,16	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
Tir objetivo	12%										
D/E Ratio	1,5										
Interest rate	5%										
Tax rate	25%										
Vida préstamo	10										
%CAPEX mantenimiento	3%										
Inflación	2%										
O&M Factor	5%										
% debt	60%										
Enterprise value	0,50										
1000000											
		EBIT	36,13	37,13	38,15	39,19	40,25	41,33	42,44	43,56	44,71
		D&A	13,84	13,84	13,84	13,84	13,84	13,84	13,84	13,84	13,84
		CAPEX	(345,90)	(10,38)	(10,38)	(10,38)	(10,38)	(10,38)	(10,38)	(10,38)	(10,38)
		Debt	207,54	(20,8)	(20,8)	(20,8)	(20,8)	(20,8)	(20,8)	(20,8)	(20,8)
		Interest		(10,4)	(9,3)	(8,3)	(7,3)	(6,2)	(5,2)	(4,2)	(3,1)
		Taxes		(6,44)	(6,95)	(7,46)	(7,98)	(8,51)	(9,04)	(9,57)	(10,11)
		FCF	(138,36)	2,02	3,55	5,09	6,65	8,22	9,81	11,42	13,04
		FCF + TV	(138,36)	2,02	3,55	5,09	6,65	8,22	9,81	11,42	13,04
		Discount factor	1	1	1	1	1	1	0	0	0
		DCF	(138,36)	1,81	2,83	3,62	4,23	4,67	4,97	5,17	5,29
		FCF cumulative	(138,36)	(136,34)	(132,79)	(127,70)	(121,05)	(112,82)	(103,01)	(91,59)	(78,55)
		DCF cumulative	(138,36)	(136,55)	(133,73)	(130,10)	(125,87)	(121,21)	(116,24)	(111,07)	(105,80)
										(105,80)	(100,51)

Pestaña del modelo relevante en cuanto a los inputs y el cálculo del DCF para FT.

Producción SAF	77.628
Coste nivelado Lz	5.588,21 €
LCoSAF (euros/K)	6,83
VAN accionista(€)	0,03
Payback	12
IRR equity	12,00%
DSCR	1,60

<i>Meuros</i>										
Revenues	-	433,79	442,46	451,31	460,34	469,55	478,94	488,52	498,29	508,25
Other products revenues	-	9,59	9,78	9,98	10,18	10,38	10,59	10,80	11,01	11,24
Power cost	-	(8,22)	(8,38)	(8,55)	(8,72)	(8,90)	(9,07)	(9,26)	(9,44)	(9,63)
Feedstock costs	-	(358,37)	(365,53)	(372,84)	(380,30)	(387,91)	(395,66)	(403,58)	(411,65)	(419,88)
O&M	-	(19,77)	(20,16)	(20,56)	(20,98)	(21,40)	(21,82)	(22,26)	(22,70)	(23,16)
EBITDA	-	57,03	58,17	59,33	60,52	61,73	62,96	64,22	65,50	66,82
<i>Ebitda margin</i>	-	13,15%	13,15%	13,15%	13,15%	13,15%	13,15%	13,15%	13,15%	13,15%
Depreciation	-	(15,81)	(15,81)	(15,81)	(15,81)	(15,81)	(15,81)	(15,81)	(15,81)	(15,81)
EBIT	-	41,21	42,35	43,52	44,70	45,91	47,15	48,41	49,69	51,00
<i>Ebit margin</i>	-	9,50%	9,57%	9,64%	9,71%	9,78%	9,84%	9,91%	9,97%	10,03%
Financial expenses	-	(11,9)	(10,7)	(9,5)	(8,3)	(7,1)	(5,9)	(4,7)	(3,6)	(2,4)
EBT	-	29,35	31,68	34,03	36,40	38,80	41,22	43,66	46,13	48,63
Taxes	-	(7,34)	(7,92)	(8,51)	(9,10)	(9,70)	(10,30)	(10,92)	(11,53)	(12,16)
Net Profit	-	22,02	23,76	25,52	27,30	29,10	30,91	32,75	34,60	36,47
<i>Net profit margin</i>	-	5,08%	5,37%	5,66%	5,93%	6,20%	6,45%	6,70%	6,94%	7,18%

Cuenta de pérdidas y ganancias para MtJ.

Producción SAF	68.493
Precio SAF (euros/t SAF)	6.253
LCoSAF (euros/Kg SAF)	7,70 €
VAN (€m)	0,50
Payback	12
RR shareholder	12,03%
DSCR	1,61

<i>Meuros</i>										
Revenues	-	428,30	436,86	445,60	454,51	463,60	472,88	482,33	491,98	501,82
Other products revenues	-	15,22	15,53	15,84	16,15	16,48	16,80	17,14	17,48	17,83
Power cost	-	(20,55)	(20,96)	(21,38)	(21,81)	(22,24)	(22,69)	(23,14)	(23,60)	(24,08)
Feedstock costs	-	(355,71)	(362,82)	(370,08)	(377,48)	(385,03)	(392,73)	(400,58)	(408,60)	(416,77)
O&M	-	(17,29)	(17,64)	(17,99)	(18,35)	(18,72)	(19,10)	(19,48)	(19,87)	(20,26)
EBITDA	-	49,97	50,97	51,99	53,03	54,09	55,17	56,27	57,40	58,55
<i>Ebitda margin</i>	-	11,67%	11,67%	11,67%	11,67%	11,67%	11,67%	11,67%	11,67%	11,67%
Depreciation	-	(13,84)	(13,84)	(13,84)	(13,84)	(13,84)	(13,84)	(13,84)	(13,84)	(13,84)
EBIT	-	36,13	37,13	38,15	39,19	40,25	41,33	42,44	43,56	44,71
<i>Ebit margin</i>	-	8,44%	8,50%	8,56%	8,62%	8,68%	8,74%	8,80%	8,85%	8,91%
Financial expenses	-	(10,4)	(9,3)	(8,3)	(7,3)	(6,2)	(5,2)	(4,2)	(3,1)	(2,1)
EBT	-	25,76	27,79	29,85	31,93	34,03	36,14	38,29	40,45	42,63
Taxes	-	(6,44)	(6,95)	(7,46)	(7,98)	(8,51)	(9,04)	(9,57)	(10,11)	(10,66)
Net Profit	-	19,32	20,84	22,39	23,95	25,52	27,11	28,71	30,34	31,98
<i>Net profit margin</i>	-	4,51%	4,77%	5,02%	5,27%	5,50%	5,73%	5,95%	6,17%	6,37%

Cuenta de pérdidas y ganancias para FT.

Cálculo del LCoSAF

	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036
Net cost	395	434	440	447	454	461	468	475	483	491	498
Discounted net cost	395,31	387,31	351,03	318,18	288,45	261,52	237,14	215,05	195,05	176,92	160,50
NPV of costs (m€)	4155,99										
Producción SAF descontada		69.309	61.883	55.252	49.332	44.047	39.328	35.114	31.352	27.993	24.993
NPV of SAF (t)	608.828										

Cálculo de la deuda

Monto total	23,72	Debt		-23,72	-23,72	-23,72	-23,72	-23,72	-23,72	-23,72	-23,72
		Interest		-11,86	-10,67	-9,49	-8,30	-7,12	-5,93	-4,74	-3,56
		Restante de la deuda	237,19	213,47	189,75	166,03	142,31	118,59	94,88	71,16	47,44

Cálculo del DSCR

	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036
CFADS	57,03	58,17	59,33	60,52	61,73	62,96	64,22	65,50	66,82	68,15
Debt service	35,58	34,39	33,21	32,02	30,83	29,65	28,46	27,28	26,09	24,90
DSCR	1,60	1,69	1,79	1,89	2,00	2,12	2,26	2,40	2,56	2,74

Cálculo del LCoSAF, de la deuda y del DSCR para MtJ.

Cálculo del LCoSAF

	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036
Net cost	346	435	442	449	456	463	471	478	486	494	502
Discounted	345,90	388,45	352,27	319,51	289,82	262,92	238,54	216,44	196,41	178,25	161,79
NPV of cost	4137,87										
Producción SAF descontada		61.155	54.602	48.752	43.529	38.865	34.701	30.983	27.663	24.699	22.053
NPV of SAF	537.201										

Cálculo de la deuda

Monto total	20,75	Debt		-20,75	-20,75	-20,75	-20,75	-20,75	-20,75	-20,75	-20,75
		Interest		-10,38	-9,34	-8,30	-7,26	-6,23	-5,19	-4,15	-3,11
		Restante de la deuda	207,54	186,79	166,03	145,28	124,52	103,77	83,02	62,26	41,51

Cálculo del DSCR

	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036
CFADS	49,97	50,97	51,99	53,03	54,09	55,17	56,27	57,40	58,55	59,72
Debt service	31,13	30,09	29,06	28,02	26,98	25,94	24,90	23,87	22,83	21,79
DSCR	1,61	1,69	1,79	1,89	2,00	2,13	2,26	2,40	2,56	2,74

Cálculo del LCoSAF, de la deuda y del DSCR para FT.

ANEXO III

ANÁLISIS DEL WACC

Para entender mejor la rentabilidad del modelo, se ha realizado un cálculo del wacc (*weighted average cost of capital*). Es interesante no solo conocer únicamente la TIR que exige el accionista, si no el coste promedio con el que se van a financiar las actividades. El wacc en muchos proyectos sirve como la tasa mínima de rentabilidad. La fórmula para el cálculo del wacc es la media ponderada del coste de la deuda y el coste del equity. La fórmula para el coste del equity es la siguiente:

$$rf + \beta * (\text{Coste préstamo} - rf) + \text{prima por riesgo}$$

Ecuación 9: Cálculo del coste del equity

Donde rf es la tasa libre de riesgo del mercado, que viene dada por el bono europeo a 10 años, el coste del préstamo es el ERP, o la prima de riesgo del mercado, y la beta hace relación a un factor que mide el riesgo de un determinado mercado. En este caso se ha tomado 1,45 de acuerdo con el análisis de fábricas de producción química (Damodaran, 2026), teniendo en cuenta que es una tecnología aún en desarrollo. Los valores para el cálculo del wacc se presentan en la siguiente tabla:

	MTJ	FT
% deuda	60%	60%
10 year EUR-Bond	3%	3%
Tasa impositiva	25%	25%
Levered beta	1,45	1,45
ERP	6%	6%
Technology risk premium	6%	5%
Coste préstamo	3,70%	3,70%
Coste del equity	13,16%	12,16%
Coste de la deuda	5%	5%
WACC	8,47%	8,07%

Tabla 9: Cálculo del WACC en el modelo

Se ha tomado una prima de riesgo más alta en MTJ que en FT porque es una tecnología que aún no está certificada en el mercado, y por tanto tiene un mayor riesgo frente a un proceso ya consolidado. Como se ve en la tabla, el *wacc* indica que la rentabilidad del proyecto mínimo se sitúa en torno a valores cercanos al 8-8,5%. Por ello, la rentabilidad del 12% que se presenta en el modelo hace que sean unas plantas rentables.