

Definição de Estratégias Para Produção e Consumo de Combustíveis Sustentáveis Para a Aviação em Portugal

Mário João Carvalho de Pinto Balsemão

Dissertação para obtenção o Grau de Mestre em

Engenharia e Gestão da Energia

Orientador: Prof. Paulo Manuel Cadete Ferrão

Júri

Presidente: Prof. Susana Isabel Carvalho Relvas

Orientador: Prof. Paulo Manuel Cadete Ferrão

Vogal: Prof. Carlos Augusto Santos Silva

Outubro 2021

“He who is fixed to a star
does not change his mind.”

Leonardo da Vinci

Agradecimentos

Esta tese é o fim de um longo percurso que eu dificilmente teria conseguido percorrer sozinho, assim é com muita felicidade que agradeço a todos aqueles que até aqui me apoiaram e acompanharam.

Primeiro gostaria de agradecer à minha mãe, Rosa, qualquer sucesso meu começou num sacrifício seu. Agradeço também ao professor Paulo Ferrão pela sabedoria e conhecimento que partilhou, mas também pela compreensão e amizade em alguns momentos mais difíceis.

Estou igualmente grato àqueles que ajudaram diretamente a execução deste trabalho. Ao Andy Lerens, que para além de ser uma inspiração ajudou na revisão. Ao Daniel Fernandes, também pela revisão, mas sobretudo pelas múltiplas reuniões em que trocamos ideias sobre as nossas teses, muitas vezes comprovando os benefícios da fermentação anaeróbica. À Bárbara Rodrigues, por verificar a minha solução ao problema de programação linear de múltiplos objetivos e também por fazer aparecer os números pares na numeração das páginas. Ao Diogo Gaspar, por convencer a Bárbara a ajudar-me com os números pares desaparecidos na numeração das páginas. Aos meus amigos de Machico, especialmente ao Nuno Martins, por compreenderem o meu desaparecimento durante 2021. À Joana Vicente, por ser teimosa e motivadora, mas essencialmente por partilhar comigo o interesse por dinossauros.

Porque tornaram a minha passagem pelo Instituto Superior Técnico ainda mais agradável, obrigado aos restantes Doces. Sei que não é fácil aturar-me.

Por fim, ao meu Pai a quem dedico este voo.

ABSTRACT

Development of strategies for the production and consumption of sustainable aviation fuels (SAF) in Portugal, based on an extensive interdisciplinary literature review, referring to existing strategies and the state of the art. Three potential conversion routes were selected: Hydrotreated Esters and Fatty Acids (HEFA), Alcohol-to-Jet (ATJ) and Fischer-Tropsch (FT). For an initial approximation to the environmental impacts of SAF, an analytic production model was elaborated to determine the best use of resources to reduce greenhouse gases (GHG) emissions. The model applied to these routes and their resources allowed for an optimization via linear programming with two objective functions, GHG reduction and cost. Two scenarios resulted that maximize the reduction of GHG emissions (12 to 18%) and minimize cost. A techno-economic model was developed, dedicated to ascertaining the mass and energy balances of the three associated biorefineries (ATJ-E, ATJ-B and FT), as well as their efficiency and conditions for economic viability. From the latter model it emerged that the ATJ-E biorefinery is currently the most competitive. A sensitivity analysis shows that with hydrogen at 5.2 €/kg, no modeled biorefinery is viable, while at 3.2 €/kg all would be viable. With hydrogen at 6.5 €/kg, the minimum SAF selling price ranges from 0.60 to 0.81 €/L. Finally, a strategy was suggested based on a unique strategic matrix and composed of 3 phases: study, demonstration and implementation of biorefineries, based on scenarios obtained from the first model and deepened in the techno-economic model.

Keywords: energy, SAF, aviation, biofuels, strategy, sustainability

RESUMO

Desenvolvimento de estratégias para a produção e consumo de combustíveis de aviação sustentáveis (SAF) em Portugal, com base numa extensa revisão interdisciplinar da literatura, referindo-se às estratégias existentes e ao estado da arte. Foram selecionadas três potenciais rotas de conversão: Ésteres Hidroprocessados e Ácidos Gordos (HEFA), Álcool para Jet (ATJ) e Fischer-Tropsch (FT). Numa aproximação inicial aos impactos ambientais dos SAF, foi elaborado um modelo analítico de produção que determina a melhor utilização de recursos para reduzir as emissões de gases com efeito de estufa (GEE). O modelo aplicado a estas rotas e aos seus recursos permitiu uma otimização através de programação linear com duas funções objetivo, redução de GEE e custo. Resultaram dois cenários que maximizam a redução das emissões de GEE (12 a 18%) e minimizam o custo. Foi desenvolvido um modelo técnico-económico, dedicado à determinação dos balanços de energia e massa das três biorrefinarias associadas (ATJ-E, ATJ-B e FT), bem como a sua eficiência e condições de viabilidade económica. A partir deste último modelo verificou-se que a biorrefinaria ATJ-E é atualmente a mais competitiva. Uma análise de sensibilidade mostra que com hidrogénio a 5,2 €/kg, nenhuma biorrefinaria modelada é viável, enquanto que com 3,2 €/kg todas seriam viáveis. Com hidrogénio a 6,5 €/kg, o preço mínimo de venda SAF varia entre 0,60 e 0,81 €/L. Finalmente, foi sugerida uma estratégia baseada numa matriz estratégica única e composta por 3 fases: estudo, demonstração e implementação de biorrefinarias, com base em cenários obtidos a partir do primeiro modelo e aprofundados no modelo tecno-económico.

Palavras-chave: energia, SAF, aviação, biocombustíveis, estratégia, sustentabilidade

Índice

1	Introdução.....	1
1.1	Objetivos.....	4
1.2	Estrutura da Tese	5
2	Revisão de Literatura	6
2.1	Análise de Estratégias Existentes	6
2.1.1	Internacional.....	6
2.1.2	Europa	11
2.1.3	Nacional.....	12
2.1.4	Identificação de Barreiras e Oportunidades	14
2.2	Identificação de Potenciais Cadeias de Produção de SAF	15
2.2.1	FT-SPK e FT-SPK/A.....	17
2.2.2	HEFA-SPK.....	18
2.2.3	SIP-HFS.....	19
2.2.4	ATJ-SPK.....	19
2.2.5	Alternativas aos SAF	19
2.2.6	Análise do Estado da Arte dos SAF	21
2.3	Estado da Arte da Produção de SAF	23
2.3.2	Conclusões do Estado da Arte	38
3	Modelação das Potenciais Cadeias de Produção de SAF em Portugal	41
3.1	Produção e Consumo de Combustível Tradicional para a Aviação	41
3.2	Modelo Analítico de Produção.....	43
3.2.1	Discussão de Cenários Estudados Através do Modelo Analítico de Produção	45
3.3	Modelo Tecno-económico	56
3.3.1	Modelo Técnico - ATJ.....	57
3.3.2	Modelo Técnico – Via FT.....	61
3.3.3	Modelo Económico	64
3.3.4	Modelo Tecno-económico - Discussão de Resultados	67
4	Sugestões para a Definição de Estratégias para Produção de SAF em Portugal.....	76
5	Conclusões.....	78

Referências	81
Anexos.....	87
Anexo 1	87
Anexo 2	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades importantes no combustível tradicional para aviação comercial (adaptado) (Vásquez, Silva and Castillo, 2017).	17
Tabela 2 – Vias de conversão aprovadas pela ASTM <i>International</i> (adaptado) (ICAO, 2018).	22
Tabela 3 – Escala FRL definida pela CAAFI (adaptado) (Mawhood <i>et al.</i> , 2016).	22
Tabela 4 – FRL das famílias de produção de SAF certificadas pela ASTM.	23
Tabela 5 – Valores padrão de emissões de GEE das vias de produção em implementação comercial (adaptado) (Sustainable Aviation, 2020).	23
Tabela 6 – Principais reações durante a gaseificação de resíduos urbanos (adaptado) (Arena, 2012).	25
Tabela 7 - Caracterização comum de fatores importantes relativos à matéria-prima utilizada via gaseificação (adaptado) (Chowdhury, 2014), (Arena, 2012).	28
Tabela 8 – Comparação entre as características do <i>syngas</i> obtido da gaseificação de madeira e carvão referente à gaseificação (adaptado) (Castanheira, 2017).	28
Tabela 9 – Eficiências típicas na gaseificação de resíduos urbanos utilizando ar enriquecido com oxigênio (adaptado) (Arena, 2012).	29
Tabela 10 – Parâmetros energéticos dos principais tipos de gaseificadores (adaptado) (Chowdhury, 2014).	29
Tabela 11 – Lista de custos de um módulo de gaseificação de 20 MW (adaptado) (Alamia, 2017). ...	30
Tabela 12 – Biorrefinarias comerciais de síntese FT via gaseificação de biomassa (Red Rock Biofuels, 2020) (Fulcrum Bioenergy, 2020) (Alt Alto, 2020).	30
Tabela 13 – Principais parâmetros do hidrocessamento de <i>Jatropha</i> e as suas características enquanto matéria-prima (adaptado) (ICAO, 2018) (Vásquez, Silva e Castillo, 2017).	31
Tabela 14 – Principais tecnologias de hidrocessamento utilizadas comercialmente (Honeywell UOP, 2016) (Neste Oil, 2019).	32
Tabela 15 – Intervalo de valores de MFSP e emissões de GEE na síntese de isobutanol.	35
Tabela 16 – Condições das unidades de processamento na via ATJ (adaptado) (Geleynse <i>et al.</i> , 2018).	36
Tabela 17 - Rendimentos mássicos na literatura para as etapas da via de produção ATJ, etanol.	37
Tabela 18 - Rendimentos mássicos na literatura para as etapas da via de produção ATJ, isobutanol.	38
Tabela 19 - Recursos e rendimentos da via ATJ (etanol) utilizando sobranço de milho como matéria-prima.	38
Tabela 20 – Rendimentos das vias de conversão (adaptado) (Alves <i>et al.</i> , 2016).	39
Tabela 21 – Médias Mensais Nacionais da Procura e das Emissões de GEE referentes à indústria do combustível para jato, ao longo da última década.	43
Tabela 22 – Parâmetros do modelo analítico de produção das vias de produção.	44
Tabela 23 – Resultados do modelo analítico de produção: Cenário 1.	46
Tabela 24 – Resultados do modelo analítico de produção: Cenário 2.	46

Tabela 25 – Biomassa disponível para biorrefinarias em Portugal continental.	47
Tabela 26 – Composição das Matérias-primas selecionadas.....	48
Tabela 27 – Resultados do modelo analítico de produção: Cenário 3.	48
Tabela 28 – Soluções do problema de programação linear.	51
Tabela 29 – Resultados do modelo analítico de produção: Cenário 4.	53
Tabela 30 – Resultados do modelo analítico de produção: Cenário 5.	53
Tabela 31 – Comparação numérica das emissões de GEE da produção de combustível a jato sem SAF, cenário 4 e cenário 5.	54
Tabela 32 - Rendimentos mássicos médios das etapas da via ATJ para o etanol (ATJ -E) e isobutanol (ATJ -B).	57
Tabela 33 - Rendimentos das etapas principais da via ATJ.	59
Tabela 34 - PCI dos produtos e matérias-primas utilizadas na via ATJ.	60
Tabela 35 - Densidades dos produtos finais.	60
Tabela 36 - Composição de <i>syngas</i> proveniente da gaseificação de resíduos de eucalipto (adaptado) (Nwokolo, Mukumba and Obileke, 2020)	62
Tabela 37 - Parâmetros aplicados na extrapolação da via ATJ através da lei das potências.....	65
Tabela 38 - Parâmetros aplicados na extrapolação da via FT através da lei das potências.....	66
Tabela 39 - Preços associados aos produtos e recursos do modelo tecno-económico.....	66
Tabela 40 - Balanços de massa e de energia para a via ATJ do modelo tecno-económico, cenário 4.	69
Tabela 41 - Eficiências do modelo tecno-económico, cenários 4 e 5.....	69
Tabela 42 - Custos e receitas das biorrefinarias ATJ no cenário 4.	69
Tabela 43 - Parâmetros de viabilidade económica das biorrefinarias ATJ, cenário 4.....	69
Tabela 44 - Balanços de massa e de energia para a via ATJ do modelo tecno-económico, cenário 5.	70
Tabela 45 - Custos e receitas das biorrefinarias ATJ no cenário 5.	70
Tabela 46 - Parâmetros de viabilidade económica das biorrefinarias ATJ, cenário 5.....	70
Tabela 47 – Parâmetros sobre consumos e emissões da via ATJ, cenários 4 e 5.	71
Tabela 48 - Balanços de massa e de energia para a via FT do modelo tecno-económico, cenários 4 e 5.....	72
Tabela 49 - Custos e receitas da biorrefinaria FT em ambos os cenários.	72
Tabela 50 - Parâmetros de viabilidade económica da biorrefinaria FT.	73
Tabela 51 - Comparação de resultados entre o modelo analítico de produção e o modelo tecno-económico.	73

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – RPK e FTK da indústria ao longo dos anos (Industry High-level Group, 2019).	1
Figura 2 – Metas e projeções de emissões de GEE (European Environment Agency, 2019 ^a).	2
Figura 3 – Emissões de GEE no sector do transporte na EU (adaptado) (European Environment Agency, 2019b).	3
Figura 4 – Produção de Biocombustíveis em 2019 comparado com o consumo em 2030, de acordo com o SDS (IEA, 2020).	6
Figura 5 – Princípios de utilização em cascata enquadrada numa economia de biomassa (adaptado) (Pinto <i>et al.</i> , 2017).	14
Figura 6 - Densidades energéticas volumétricas e gravimétricas de formas alternativas de energia final para o sector dos transportes.	20
Figura 7 - Esquema com exemplos de produção FT (a) e via álcoois (b), de combustíveis através da gaseificação de material lignocelulósico (Diederichs <i>et al.</i> , 2016).	26
Figura 8 - Principais tipos de gaseificador.	26
Figura 9 - Tipos de gaseificadores. A) escoamento ascendente b) escoamento descendente c) EF d) BFB e) CFB f) DFB g) plasma. (adaptado) (E4Tech, 2009).	27
Figura 10 – Frações molares do <i>syngas</i> em função da razão de equivalência (Arena, 2012).	28
Figura 11 – Hidrogenação (Vásquez, Silva and Castillo, 2017).	30
Figura 12 - Frações anuais de custos operacionais na produção de isobutanol, comparando dois processos diferentes, um sem decapagem a vácuo (SCA) e outro com (SCB) (Roussos <i>et al.</i> , 2019).	35
Figura 13 – Esquematização da via ATJ a partir de biomassa (Gutiérrez-Antonio <i>et al.</i> , 2017).	37
Figura 14 – Esquema simplificado das vias de conversão HEFA, FT e ATJ.	40
Figura 15 – Produção e Consumo de Combustível para a Aviação em Portugal, entre Janeiro de 2010 e Outubro de 2020.	41
Figura 16 – Sazonalidade da Procura Nacional de Combustível para Jato ao longo da última década.	42
Figura 17 - Resolução gráfica do problema de programação linear, a área rosa representa as soluções viáveis e os vértices são onde poderão ser encontradas as soluções ótimas de cada função objetivo.	51
Figura 18 – Comparação gráfica das emissões de GEE da produção de combustível a jato sem SAF, cenário 4 e cenário 5.	53
Figura 19 - Matriz estratégica da implementação de SAF.	77
Figura Anexada 1 – Vias de conversão certificadas para biocombustíveis (adaptado) (Boeing <i>et al.</i> , 2013).	87
Figura Anexada 2 – Conceptualização esquemática da via de produção ATJ, tanto para etanol como para isobutanol.	88
Figura Anexada 3 – Conceptualização esquemática da via de produção FT.	89
Figura Anexada 4 - Diagrama de Sankey dos fluxos mensais de energia na biorrefinaria ATJ-E, cenário 4 (TJ/mês)	90

Figura Anexada 5 - Diagrama de Sankey dos fluxos mensais de energia na biorrefinaria ATJ-E, cenário 5 (TJ/mês).....	90
Figura Anexada 6 - Diagrama de Sankey dos fluxos mensais de energia na biorrefinaria ATJ-B, cenário 4 (TJ/mês).....	91
Figura Anexada 7 - Diagrama de Sankey dos fluxos mensais de energia na biorrefinaria ATJ-E, cenário 5 (TJ /mês).....	91
Figura Anexada 8 - Diagrama de Sankey dos fluxos mensais de energia na biorrefinaria FT, cenários 4 e 5 (TJ/mês).....	92

LISTA DE ABREVIATURAS

APA - Agência Portuguesa do Ambiente

ASTM - *American Society for Testing and Materials* - Sociedade Americana de Testes de Materiais

ATJ - *Alcohol-to-Jet* - Combustível para aviação sintetizado a partir do Álcool

CAAFI - *Commercial Aviation Alternative Fuels Initiative* - Iniciativa de Combustíveis Alternativos para a Aviação Comercial

CAEP - *Committee on Aviation Environmental Protection* - Comité de Proteção Ambiental na Aviação

CAPEX - *Capital Expenditures* - Investimento de Capital

CARB - *California Air Resources Board* - Conselho de Recursos do Ar da Califórnia

CEF - CORSIA Eligible Fuels - Combustíveis Elegíveis no CORSIA

CELE - Comércio Europeu de Licenças de Emissão

CERT - *CO₂ Estimation and Reporting Tool* - Ferramenta para Estimativas e Relatórios do CORSIA

CI - *Carbon Intensity* - Intensidade Carbónica

CORSIA - *Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation* - Regime de Compensação e Redução das Emissões de Carbono para a Aviação Internacional

DLUC - *Direct Land-Use Change* - Mudanças Diretas no Uso da Terra

DGEG - Direção Geral de Energia e Geologia

EEA - *European Environment Agency* - Agência Europeia do Ambiente

EPA - *Environmental Protection Agency* - Agência de Proteção Ambiental dos EUA

ESFERA - *European Sustainable Fuel Routes for Aviation* - Roteiros Europeus de Combustível Sustentável para a Aviação

EUA - Estados Unidos da América

FT - Fischer-Tropsch

FRL - *Fuel Readiness Level* - Nível de Prontidão de Combustível

GEE - Gases com Efeito de Estufa

GFAAF - *Global Framework for Alternative Aviation Fuels* - Enquadramento Global dos Combustíveis Alternativos para a Aviação

HEFA - *Hydrotreated Esters and Fatty Acids* - Ésteres Hidroprocessados e Ácidos Gordos

I&D&I - Investigação, Desenvolvimento e Inovação

IATA - *International Air Transport Association* - Associação Internacional de Transportes Aéreos

ICAO - *International Civil Aviation Organization* - Organização da Aviação Civil Internacional

IEA - *International Energy Agency* - Agência Internacional de Energia

ILUC - *Indirect Land-Use Changes* - Mudanças Indiretas no Uso da Terra

IPPC - *Intergovernmental Panel on Climate Change* - Painel Intergovernamental para as Mudanças Climáticas

IRENA - *International Renewable Energy Agency* - Agência Internacional de Energias Renováveis

LCA - *Life-cycle Assessment* - Análise de Ciclo de Vida

LCFS - *Low Carbon Fuel Standard* - Standard de Combustíveis de Baixo Carbono

LNEG - Laboratório Nacional de Energia e Geologia

MFSP - *Minimum Fuel Selling Price* - Preço Mínimo de Venda de Combustível

MSAFSP - *Minimum SAF Selling Price* - Preço Mínimo de Venda de SAF

OAU - Óleos Alimentares Usados

OPEX - *Operational Expenditure* - Despesas Operacionais

PNEC2030 - Plano Nacional de Investimentos 2030

PNI2030 - Plano Nacional de Investimentos 2030

RED - *Renewable Energy Directive* - Diretiva das Energias Renováveis

RFS - *Renewable Fuel Standard* - Standard de Combustíveis Renováveis

RIN - *Renewable Identification Number* - Número de Identificação Renovável

RNC2050 - Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050

RUB - Resíduos Urbanos Biodegradáveis

SAF - *Sustainable Aviation Fuels* - Combustíveis Sustentáveis para a Aviação

SDS - *Sustainable Development Scenarios* - Cenário de Desenvolvimento Sustentável (IEA)

SIP - *Synthesized Iso-Paraffins* - Combustíveis Iso-Parafínicos Sintetizados

SKA - *Synthesized Aromatic Kerosene* - Queroseno Parafínico Sintetizado com elevado conteúdo Aromático

SPK - *Synthesized Paraffinic Kerosene* - Queroseno Parafínico Sintetizado

TEA - *Techno-Economic Analysis* - Análise Tecno-económica

TIR - Taxa Interna de Retorno

UE - União Europeia

VAL - Valor Atualizado Líquido

1 Introdução

Desde o nascimento das civilizações que o ser humano é fascinado pelo voo. A utilização de papagaios de papel é registada na China desde há milhares de anos (Deng, 2011) e ainda hoje perdura em muitas culturas. Leonardo da Vinci estudou, durante mais de duas décadas, o voo de aves e a possibilidade de desenvolver máquinas que permitissem aos humanos voar. Entre os seus trabalhos estão cerca de 5 centenas de desenhos combinados com 35 mil palavras sobre estes temas (Isaacson, 2017). No dia 17 de Dezembro de 1903, o primeiro voo controlado por um humano, a bordo de uma máquina motorizada e mais pesada do que o ar, foi alcançado pelos irmãos Orville e Wilbur Wright, dando início à aviação moderna (Smithsonian National Air and Space Museum, 2020). A partir dessa data, a aviação evoluiu constantemente, marcada por grandes inovações que hoje permitem a qualquer pessoa viajar através do globo de forma segura e em relativamente pouco tempo. Hoje, a indústria da aviação é um dos pilares da nossa civilização.

Nos tempos modernos, a civilização humana está cada vez mais interligada como consequência da globalização. O sector da aviação, não só promove este fenómeno como também dele beneficia, estando constantemente em crescimento, algo ilustrado na figura 1. Na sua totalidade e em condições normais, o sector suporta 65.5 milhões de empregos e representa 2.7 biliões (USD) do produto interno bruto mundial, um valor correspondente a 3.6% (Industry High-level Group, 2019). Em 2018, de acordo com a Organização da Aviação Civil Internacional (ICAO, 2020c) voaram cerca de 4,3 mil milhões de passageiros, um crescimento de 6.4% em relação ao ano anterior. Analogamente, o número de partidas atingiu os 37,8 milhões depois de um aumento de 3.5% em relação a 2017.

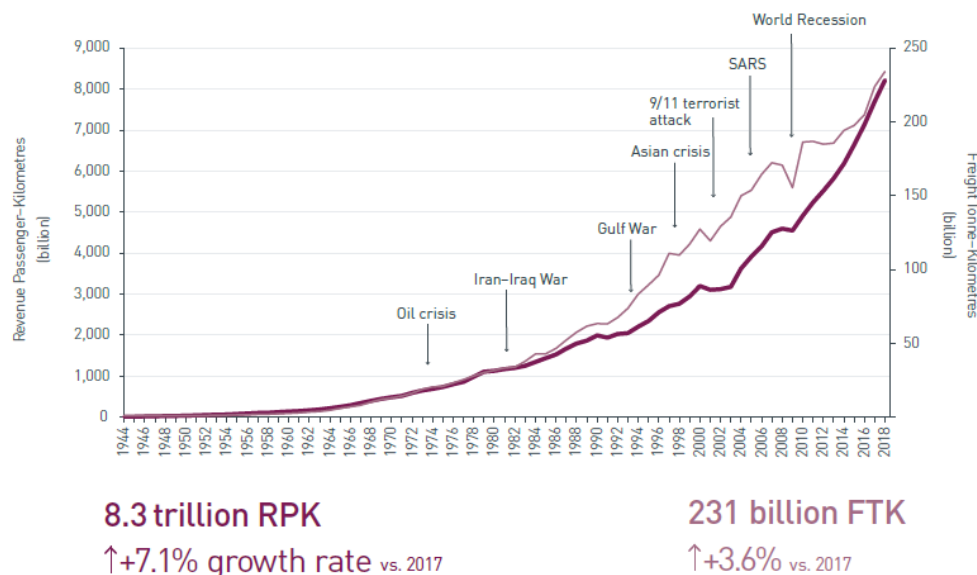


Figura 1 – RPK¹ e FTK² da indústria ao longo dos anos (Industry High-level Group, 2019).

¹ *Revenue Passenger-Kilometers*: métrica da indústria que mostra o número de quilómetros viajados por passageiros pagantes.

² *Freight Tonne-Kilometers*: semelhante ao RPK, mas dedicado à carga transportada.

As estimativas para longo prazo preveem 10 mil milhões de passageiros e 90 milhões de partidas em 2040 (ICAO, 2020c). Nas próximas duas décadas espera-se ainda um aumento da frequência de voos do cidadão comum, com previsões de um aumento de 4 a 8% por ano, do número de viagens aéreas por pessoa em mercados emergentes e cerca de 1 a 2% em países desenvolvidos (IATA, 2019). Estas estimativas, embora focadas no longo prazo, são anteriores à pandemia resultante do SARS-CoV-2, que, devido ao efeito global que atingiu uma escala sem precedentes (a figura 1 ilustra o efeito do surto de SARS-CoV-1³), afetará sem dúvida, de forma negativa, o futuro do sector da aviação nos próximos anos.

A propulsão a jato das aeronaves utilizadas pelo sector funciona através da combustão de produtos derivados dos combustíveis fósseis. Como tal, das operações da indústria resultam emissões de gases com efeito estufa (GEE) que contribuem para o aquecimento global e consequentemente, para as alterações climáticas. Em relação ao mais relevante entre os GEE, o dióxido de carbono (CO₂), o Painel Internacional para as Mudanças Climáticas (IPCC) estima que as emissões da indústria da aviação (doméstica e internacional) sejam 2% do total das emissões produzidas pela espécie humana. Se o sector fosse um país, seria o 8º maior emissor de CO₂ e, tendo em conta a dimensão e as previsões de crescimento a longo prazo, as emissões poderão atingir as 2700 Megatoneladas em 2050 (IRENA, 2017), se nenhuma medida for tomada.

Na União Europeia, apesar de alcançada uma redução das emissões totais de GEE relativa a 1990, explícita na figura 2, as projeções com as medidas existentes não atingem as taxas de redução necessárias para atingir as metas para 2050. No que toca às emissões derivadas de transportes, verifica-se um aumento durante o mesmo período, demonstrado na figura 3. Ademais, o maior aumento percentual (129%) das emissões de GEE nos transportes relativas a 1990, deve-se à aviação internacional (European Environment Agency, 2019b).

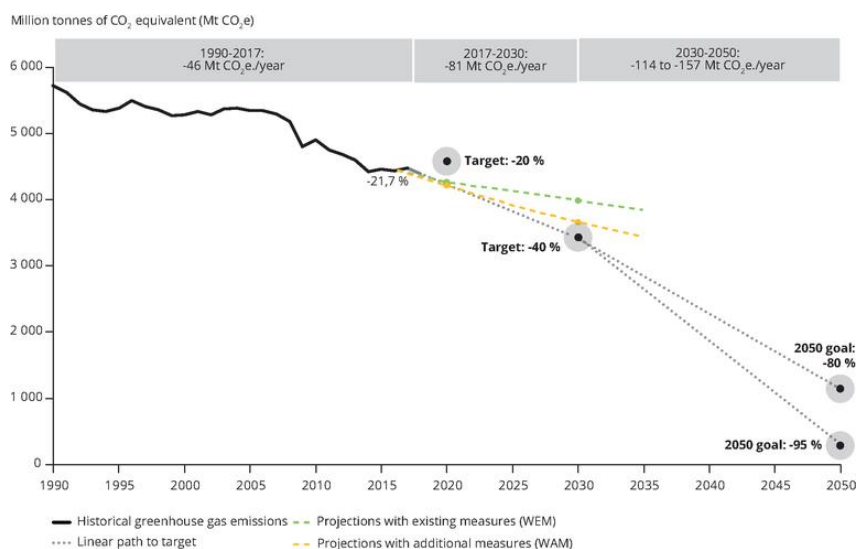


Figura 2 – Metas e projeções de emissões de GEE (European Environment Agency, 2019^a).

³ O surto de SARS-CoV-1 ocorreu entre 2002 e 2004 e apesar de não ter atingido uma propagação de dimensões globais, abalou o sector da aviação.

Preventivamente, várias organizações do sector, companhias aéreas e fabricantes de aeronaves assumiram a responsabilidade de definir metas de forma a mitigar as consequências do funcionamento da indústria. Alguns objetivos comuns entre várias entidades são o aumento da eficiência energética e o crescimento neutro em carbono a partir de 2020. Apesar dos avanços recentes em tecnologias como baterias, aviões elétricos e transporte alimentado por hidrogénio, a densidade energética destas tecnologias limita severamente a sua implementação a curto-prazo na aviação. Devido ao elevado tempo-de-vida de 25 anos, em média (Bureau of Transportation Statistics, 2018), de um avião comercial, acrescentado ao facto de se venderem enormes quantidades e de existirem encomendas com margens de uma década (CAPA - Centre for Aviation, 2018), a necessidade do sector para combustíveis líquidos de elevada densidade energética deverá permanecer durante as próximas décadas. Assim, é imperativo utilizar combustíveis denominados *drop-in*, implementáveis diretamente em toda a infraestrutura e, também, permutáveis com os atuais produtos derivados de combustíveis fósseis.

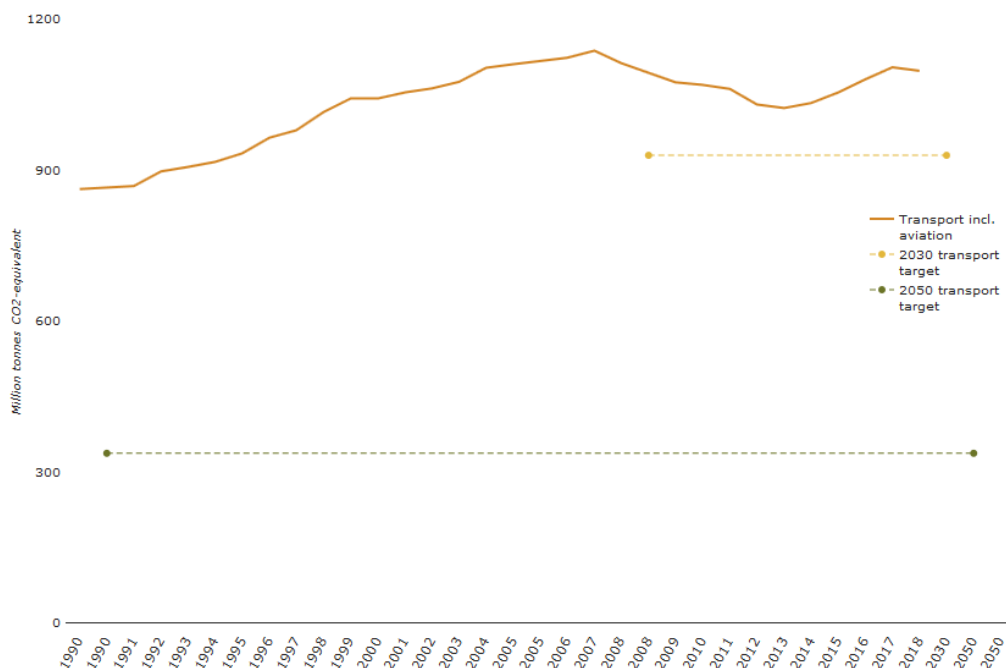


Figura 3 – Emissões de GEE no sector do transporte na EU (adaptado) (European Environment Agency, 2019b).

Em 2008, a empresa Virgin Atlantic realizou o primeiro voo parcialmente abastecido por uma fonte renovável. Um Boeing 747-400 viajou desde Londres até Amesterdão com um reator a utilizar uma mistura contendo 20% de biocombustível e o restante combustível derivado de petróleo (BBC News, 2008). Desde então, a indústria dos biocombustíveis para a aviação, embora lentamente, progrediu. Mais de 200 mil voos comerciais com passageiros foram efetuados e os combustíveis sustentáveis para a aviação (SAF, do inglês *Sustainable Aviation Fuels*) abastecem aeroportos importantes desde o LAX, na cidade de Los Angeles até aos aeroportos de Bergen e Oslo, na Noruega (Sustainable Aviation, 2020).

Os SAF são definidos como combustíveis certificados, *drop-in* e que aquiescem padrões de sustentabilidade. Estes combustíveis trazem vantagens significativas para a indústria, incluindo a oportunidade de simultaneamente reduzir as emissões de GEE e diversificar a oferta de combustíveis, manter a atual infraestrutura, apoiar o desenvolvimento de economias circulares locais e suportar o desenvolvimento sustentável. Contudo, devido a obstáculos como o elevado custo de produção, competição com o biodiesel e a ausência de políticas que incentivem a implementação, a sua adoção tem sido lenta.

Em Portugal, o Plano Nacional Integrado Energia-Clima (PNEC2030), elaborado em resposta ao regulamento relativo à Governança da União da Energia e Ação Climática (Regulamento (EU) 2018/1999), prevê atingir em 2030 uma redução de 45% a 55% das emissões de GEE em relação a 2005. Este plano, elaborado para funcionar sinergicamente com o Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050 (RNC 2050) e com o Plano Nacional de Investimentos 2030 (PNI2030), tem como linhas de atuação, entre outras, as seguintes medidas:

- *“Incentivar o investimento na produção nacional de biocombustíveis avançados, nomeadamente através da valorização dos resíduos e recursos endógenos”;*
- *“Estimular a transição energética do sector dos transportes assente na eletrificação, nos biocombustíveis avançados e no hidrogénio”;*
- *“Promover o fecho do ciclo de materiais e o aproveitamento da energia em cascata facilitando a transição para uma economia circular”.*

1.1 Objetivos

Neste contexto, o objetivo desta tese é a definição de estratégias para o consumo e produção de combustíveis sustentáveis para a aviação em Portugal. É fundamental estudar as estratégias já adotadas ao redor do globo através de uma revisão de literatura, assim como o estado da arte da produção destes combustíveis alternativos, para compreender de que forma pode ser executada a produção em Portugal. Identificar cadeias de valor e analisá-las de um ponto de vista dos impactos ambientais e da viabilidade económica é também relevante para definir estratégias realistas e sustentáveis. Deste modo, os objetivos incluem:

- Identificação das principais barreiras e oportunidades;
- Análise do estado da arte da produção de combustíveis sustentáveis para a aviação;
- Identificação de potenciais cadeias de valor para a produção destes combustíveis em Portugal;
- Análise preliminar dos impactos ambientais associados às diferentes alternativas;
- Análise das condicionantes à viabilidade económica de cada uma das alternativas;
- Sugestões para a definição de estratégias para a produção de biocombustíveis para a aviação.

1.2 Estrutura da Tese

Esta tese está estruturada em cinco capítulos. Após a introdução (1) segue-se a revisão da literatura (2), dividida em três partes referentes às estratégias já existentes (2.1), identificação das potenciais cadeias de produção de combustíveis sustentáveis para a aviação em Portugal (2.2) e ao estado da arte da produção de SAF (2.3). A modelação das potenciais cadeias de produção de SAF em Portugal é desenvolvida no terceiro capítulo (3). Este capítulo foi dividido em três secções: primeiramente quantificou-se a produção e o consumo de combustível a jato tradicional em Portugal (3.1); depois foram produzidos dois modelos, um modelo analítico de produção, descrito e utilizado na secção 3.2 e outro tecno-económico, descrito e utilizado na secção 3.3. Dada a complexidade do modelo tecno-económico, a sua descrição foi dividida em três partes: via ATJ (3.3.1), via FT (3.3.2) e economia (3.3.3), seguidas pela respetiva discussão de resultados em 3.3.4. O capítulo 4 contém as sugestões para a definição de estratégias para a produção de SAF em Portugal e finalmente o capítulo 5 aborda as conclusões.

2 Revisão de Literatura

2.1 Análise de Estratégias Existentes

De acordo com a Agência Internacional de Energia (IEA), a produção de biocombustíveis dedicada aos transportes cresceu 6% no ano de 2019, alcançando 161 mil milhões de litros, sendo esperado um aumento anual de 3% na produção durante os próximos 4 anos (IEA, 2019b). A mesma organização avalia a evolução de várias indústrias através de comparações com o seu cenário de desenvolvimento sustentável (SDS), estando este em concordância com os estudos do IPCC (IEA, 2019^a). No entanto, como ilustrado na última coluna da figura 4, a produção destes combustíveis nos sectores do transporte aéreo e marítimo está muito aquém das expectativas, apesar da alta penetração no setor rodoviário em alguns países.

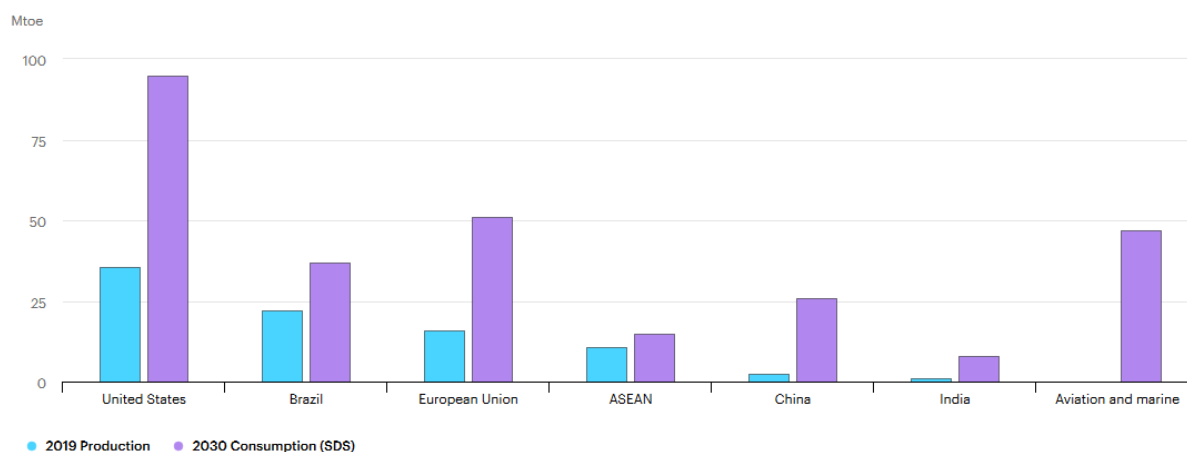


Figura 4 – Produção de Biocombustíveis em 2019 comparado com o consumo em 2030, de acordo com o SDS (IEA, 2020).

Neste contexto, a definição de estratégias e planos para desenvolver o mercado dos biocombustíveis para a aviação é um passo fundamental para alcançar a sustentabilidade no transporte aéreo. É importante compreender as estratégias já existentes e utilizá-las como referência na identificação das barreiras e oportunidades desta indústria. Assim, ao longo desta secção, são estudadas as principais estratégias existentes a nível internacional, europeu e nacional.

2.1.1 Internacional

Como referido na introdução, na última década ocorreram progressos na indústria da aviação e dos biocombustíveis, atingindo-se 15 milhões de litros de SAF produzidos em 2018, porém, este número representa apenas cerca de 0.01% da procura total (IEA, 2019b). A agência identifica ainda a

necessidade de políticas que reforcem a indústria e inovações que permitam a redução de custos, de modo a que seja possível aumentar o consumo de biocombustíveis. É necessária a existência de estruturas que garantam que apenas os biocombustíveis sustentáveis são apoiados, através da certificação via agentes independentes (IEA, 2019b). É também importante referir que a aviação internacional é da responsabilidade da ICAO e que a aviação doméstica é da responsabilidade dos governos nacionais, sendo subsídios pelo consumo e taxas aplicadas por emissão de CO₂ medidas recomendadas pela IEA.

Um dos 5 objetivos estratégicos da ICAO é “*minimizar os efeitos ambientais adversos das atividades da aviação civil*” (ICAO, 2020b). Como tal, enquanto autoridade máxima na aviação internacional nos estados signatários, estando a República Portuguesa entre eles, cabe à organização a responsabilidade de elaborar estratégias para responder às problemáticas conhecidas. Em 2010 a organização assumiu os seguintes objetivos:

1. Aumento de 2% da eficiência energética por ano até 2050;
2. Atingir um crescimento neutro em carbono a partir de 2020.

Em 2016, os estados signatários adotaram o CORSIA (*Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation*), um regime de medidas baseadas no mercado da aviação internacional (ICAO, 2019b). O CORSIA será executado em três fases: piloto (2021 até 2023), primeira fase (2024 até 2026) e a segunda fase (2027 até 2035). A fase piloto e a primeira fase serão de participação voluntária sendo que 82 estados, representando 76.64% da aviação internacional (ICAO, 2020^a), estão dispostos a participar desde o início, nos quais se inclui também Portugal (APA, 2020^a).

No âmbito do regime CORSIA, as emissões de CO₂ de todas as rotas internacionais devem ser monitorizadas. Para além disso, as emissões de todas as companhias aéreas que exercem voos entre dois estados, onde ambos os estados de origem e destino participam no CORSIA, são cobertas pelos requisitos de compensação do regime⁴. A compensação das emissões de CO₂ deverá ser efetuada com base nas emissões anuais do operador e no fator de crescimento⁵ em relação a 2020 (1) (ICAO, 2019b).

$$\text{Emissões Anuais de CO}_2 \text{ do Operador} \times \text{Factor de Crescimento (\%)} = \text{Compensação de CO}_2 \quad (1)$$

A utilização de unidades de emissões, como por exemplo créditos de carbono, tem sido recomendada por economistas durante décadas. As unidades de emissão são geradas quando, através de novas tecnologias, é alcançada uma redução nas emissões comparadas com um patamar pré-estabelecido. As unidades de emissão geradas são então registadas e posteriormente negociadas. No contexto do regime CORSIA, uma companhia aérea poderá adquirir unidades de

⁴ Excetuando emissões de operadores pequenos (<10000 t CO₂ por ano), aeronaves pequenas (<5700 kg *Maximum Take Off Mass*), aeronaves de asas giratórias e causas humanitárias, médicas e de combate a incêndios.

⁵ Fator de crescimento é o aumento em percentagem da quantidade de emissões em comparação com os dados dos anos iniciais, sendo este calculado pela ICAO em função dos aumentos de emissões do sector e do operador.

emissão para neutralizar as suas próprias emissões. Uma possível consequência deste esquema é dar oportunidade às companhias aéreas de, caso seja a alternativa mais rentável, comprar unidades de emissão em vez de reduzir as suas próprias emissões, um exemplo de incentivos perversos.

Em 2012, as companhias aéreas foram incluídas no Comércio Europeu de Licenças de Emissão (CELE), um sistema de comércio de emissões que opera no Espaço Económico Europeu (EEE)⁶ e que atende 45% das emissões de GEE da União (European Commission, 2020). No que diz respeito à aviação, o CELE abrange todos os voos com partida e chegada nos limites do EEE, incluindo voos domésticos. No âmbito deste esquema, subsídios negociáveis, cada um representando 1 tonelada de CO₂, são anualmente impostos às companhias em função de um limite, com o objetivo de manter as emissões de CO₂ do transporte aéreo europeu abaixo dos níveis médios entre 2004 e 2006.

Quando o regime CORSIA entrar em vigor, em janeiro de 2021, os dois esquemas estarão em conflito. Isto porque os voos entre países no EEE serão abrangidos por ambos, o que implica que se nenhum esquema fosse selecionado os operadores seriam penalizados duplamente. Uma solução ainda não foi definida, mas poderia ser benéfico manter o CELE em operação no EEE enquanto o CORSIA era aplicado a outras rotas internacionais. Isto, no período entre 2021 e 2035, resultaria numa redução de emissões de cerca de 1070 Mt em contraste com o abandono do CELE a favor do CORSIA, que iria resultar numa redução de apenas 400 Mt (Maertens *et al.*, 2019). Estes valores mostram que o CELE é mais ambicioso do que o CORSIA, especificamente no curto-prazo.

Para que todos os operadores aéreos possam monitorizar as suas emissões a ICAO desenvolve o procedimento de Monitorização, Comunicação e Verificação (MRV, do inglês *Monitoring, Reporting and Verification*) de emissões. Neste aspeto, os operadores europeus devem reger-se via o regime CELE, ajustado às características do CORSIA (APA, 2020b). No conjunto de medidas definidas pela ICAO, insere-se o desenvolvimento e a utilização de SAF. Para tal, definiram-se os CEF (do inglês, *CORSIA Eligible Fuels*), combustíveis elegíveis para o regime CORSIA, oferecendo assim a oportunidade aos operadores para reduzir as suas necessidades de compensação de emissões.

Em 1983 foi estabelecido pela ICAO, o Comité de Proteção Ambiental na Aviação (CAEP, do inglês *Committee on Aviation Environmental Protection*). Este comité estabeleceu reduções padrões de emissões de GEE, numa perspetiva LCA, para 16 matérias-primas⁷, existindo a possibilidade de serem introduzidas novas matérias-primas. Paralelamente, foram identificadas 6 vias de produção de SAF⁸ pela ASTM *International*, estabelecendo-se uma certificação que se relaciona com as especificações técnicas do combustível e que garante uma utilização segura. Nas secções sobre o estado da arte na produção destes combustíveis, o tema será devidamente aprofundado. A estas

⁶ Membros da União Europeia aos quais se somam a Islândia, a Noruega e o Liechtenstein.

⁷ Resíduos agrícolas, florestais e municipais; óleo de cozinha usado; sebo; óleos de milho, soja, canola e de palma; cana-de-açúcar; beterraba sacarina; grão de milho; álamo; *miscanthus*; *panicum virgatum*; óleo de palma graxo destilado.

⁸ *Fischer-Tropsch* (FT); Ésteres e ácidos gordos hidroprocessados (HEFA); Álcool (isobutanol e etanol) para jet (ATJ); Combustíveis iso-parafínicos sintetizados (SIP).

referências acrescenta-se que estes combustíveis devem obedecer aos seguintes critérios de sustentabilidade, independentemente certificados de acordo com especificações da ICAO (ICAO, 2019c):

1. Redução de 10% nas emissões de GEE quando comparados com os combustíveis de aviação comuns, numa análise de ciclo de vida (LCA);
2. Os combustíveis não devem ser produzidos a partir de matéria-prima obtida de terrenos florestais, pantanais ou trufeiras, convertidos depois de 1 de Janeiro de 2008 ou que contribuam para a degradação de reservas de carbono em terrenos semelhantes;
3. Caso o uso seja posterior a 1 de Janeiro de 2008, como definido pelas categorias de terra do IPCC, as emissões de mudanças diretas no uso da terra (DLUC) devem ser calculadas. Se estas emissões excederem as das mudanças indiretas no uso da terra (ILUC), o DLUC deverá ser utilizado;

No modelo utilizado para calcular as reduções de emissões por utilização de CEF, estas são quantificadas por ER_y , apresentado na equação 2 (ICAO, 2019^a). O operador utiliza as emissões de ciclo de vida (LS_f), obtidas após a certificação de sustentabilidade do CEF, através da sua relação com as emissões de ciclo de vida padrão (LC)⁹. O termo $MS_{f,y}$ refere-se à massa, em toneladas, do combustível do tipo f , utilizado no ano y . Finalmente, FCF é um valor fixo¹⁰ e refere-se ao fator de conversão de combustível.

$$ER_y = FCF \times \left[\sum_f MS_{f,y} \times \left(1 - \frac{LS_f}{LC} \right) \right] \quad (2)$$

Como referido acima, para além do regime CORSIA, a ICAO indicou, como estratégicas, algumas outras medidas, como por exemplo: melhorias tecnológicas nas aeronaves, melhoramentos operacionais e a utilização dos SAF (ICAO, 2019d). Neste contexto, a assembleia da ICAO solicitou aos seus Estados signatários que adotem as abordagens existentes para avaliar a sustentabilidade dos combustíveis alternativos, assim como a sua contribuição no desenvolvimento económico e social local, evitando a competição com água e comida. Assim, os critérios de sustentabilidade da ICAO e as metodologias para LCA contribuem para a partilha de informação das melhores práticas, acrescentando-se ainda a base de dados do Enquadramento Global dos Combustíveis Alternativos para a Aviação (GFAAF, do inglês *Global Framework for Aviation Alternative Fuels*) da ICAO.

A agência internacional da energia renovável (IRENA) publicou, em 2017, um relatório tecnológico sobre biocombustíveis na aviação (IRENA, 2017). Conclusões importantes do estudo incluem a identificação de obstáculos como o custo elevado de produção dos biocombustíveis, o que é duplamente penalizador devido ao combustível ser uma das principais despesas das companhias aéreas (Accenture, 2017). Outros obstáculos incluem ainda a competição com biodiesel, dificuldade em criar políticas nacionais, ao que se associa ainda a falta de incentivos políticos para a produção e,

⁹ 89 para combustível para jato e 95 para avgas [g CO_{2e}/MJ].

¹⁰ 3.16 para Jet-A/Jet-A1 e 3.10 para avgas/Jet-B [kg CO_{2e}/kg combustível].

finalmente, o combustível não ser taxado em voos internacionais (European Commission, 2019b). No sentido oposto identificam-se oportunidades como a redução de emissões de GEE, o desenvolvimento de iniciativas locais e regionais para estabelecer redes de fornecimento em aeroportos específicos, potencial de redução de custos a longo prazo e alternativa comercial às taxas sobre as emissões de GEE no futuro. O documento indica ainda a existência de precedentes, fornecendo o exemplo da indústria dos transportes rodoviários. Finalmente, o relatório sugere que mandatos à utilização de combustível sejam utilizados em associação a políticas de incentivos e subsídios.

Nos Estados Unidos da América (EUA), como demonstrado na figura 4, acontece a maior parcela da produção de biocombustíveis do planeta. Um dos pilares desta liderança é a estratégia política conhecida como *Renewable Fuel Standard* (RFS), aprovada em 2005 e expandida em 2007, informalmente conhecida como RFS2. Esta estratégia é administrada pela Agência de Proteção Ambiental dos EUA (EPA). A estratégia exige que uma quantidade, determinada anualmente, de combustível renovável substitua os combustíveis tradicionais baseados em petróleo. Os agentes sujeitos são refinarias ou importadores de combustíveis tradicionais, que podem cumprir o programa ao misturar combustíveis renováveis¹¹ nos seus produtos, ou então, ao adquirir créditos, denominados RIN (do inglês *Renewable Identification Number*), semelhantes aos do regimes CELE e CORSIA (US EPA, 2017). Os RIN são gerados quando é produzido um galão de combustível renovável e podem posteriormente ser negociados, estando os preços sujeitos às leis da oferta e procura.

Embora relativamente bem-sucedido, a complexidade do programa e a incerteza associada ao comércio de RIN, que até esteve sujeito a fraudes, tornam incerto o investimento em novos projetos de biorrefinarias (Hitchcock, 2019). Em relação aos SAF, o programa identifica a produção de combustível para aviação a partir de *camelina*. Neste aspeto, o programa foca-se mais na oportunidade dos produtores de SAF para gerar e comercializar os RIN.

Outra estratégia política interessante nos EUA existe no estado da Califórnia, o *Low Carbon Fuel Standard* (LCFS), foi aprovado em 2011 e é administrado pelo conselho de recursos do ar da Califórnia (CARB, do inglês *California Air Resources Board*). O programa exige que os produtores de combustíveis tradicionais reduzam, num prisma de LCA, a sua intensidade carbónica (CI¹², do inglês *Carbon Intensity*) (CARB, 2020). Em 2016, foi aprovada uma atualização da lei que estabeleceu uma nova meta, a ser atingida em 2030, de reduções de 40% nas emissões de GEE na Califórnia em relação aos níveis de 1990 (L. Clay, 2016). Para diminuir a sua CI, as refinarias podem produzir combustíveis com CI reduzida ou, tal como noutros sistemas de comércio de emissões já mencionados, podem adquirir créditos a operadores que produzam esses combustíveis ou ainda, tecnologias de transporte alternativas mais limpas.

¹¹ Os combustíveis renováveis neste programa inserem-se em 4 categorias: biocombustíveis celulósicos, diesel à base de biomassa, biocombustíveis avançados e combustível renovável total.

¹² Intensidade carbónica é expressa como a quantidade de emissões de GEE do ciclo de vida, por unidade energia de combustível [g CO_{2e}/MJ].

Os produtores de biocombustíveis obtêm uma nota de CI nos seus produtos ao obterem a certificação da sua produção. Embora o programa permita a certificação de SAF, à semelhança do RSF não exige diretamente a penetração de SAF no transporte aéreo. As vantagens do programa LCFS residem em ser mais objetivo e orientado para atingir uma redução das emissões de GEE, relativamente mais simples do que o RSF e ter um apoio político mais estável do que o programa nacional dos EUA (Hitchcock, 2019). No entanto, no que toca aos SAF, ambos os programas pecam por não exigirem a introdução de SAF no transporte aéreo.

2.1.2 Europa

Em relação ao continente europeu, para além do regime CELE, referido anteriormente, existe a Diretiva das Energias Renováveis (RED II). A RED II define como objetivo uma fatia de 32% oriunda de fontes renováveis na energia global da União Europeia para 2030, ficando cada estado-membro responsável pelo Plano Nacional de Energia e Clima (APREN, 2018). Relativamente ao sector dos transportes, a meta fixa-se nos 14% dos combustíveis provenientes de fonte renovável, sendo que, de forma análoga a outras estratégias, não exige frações renováveis no transporte aéreo (e no marítimo). No entanto, a diretiva valoriza a sua produção: “*A contribuição dos combustíveis renováveis não alimentares fornecidos a esses sectores (aviação e marítimo) contará 1.2 vezes o seu conteúdo energético.*” (European Commission, 2019^a). Outras medidas relevantes da diretiva incluem a obrigatoriedade de que os combustíveis alternativos reduzam em 65% as emissões de GEE e a limitação de combustíveis com altos riscos de ILUC.

Em 2011, foi elaborado um documento técnico por várias entidades em conjunto, incluindo a Comissão Europeia, produtores de biocombustíveis e representantes do sector da aviação, o objetivo era acelerar a penetração dos SAF no mercado e determinar metas para a sua quantidade no sector do transporte aéreo europeu. A iniciativa ficou conhecida como *European Advanced Biofuels FlightPath* e ambicionava delinear uma estratégia para que 2 milhões de toneladas de biocombustíveis sustentáveis fossem utilizadas anualmente na aviação em 2020 (European Commission, 2013). Não se verificaram progressos suficientes para atingir essa meta, no entanto a iniciativa distinguiu que os principais obstáculos à introdução de SAF na indústria são económicos e políticos. Especificamente, o custo elevado de matérias-primas e o elevado capital necessário para promover a produção (FlightPath, 2020).

A iniciativa FlightPath, através do projeto ESFERA (do inglês, *European Sustainable Fuel Routes for Aviation*) desenvolveu recentemente um documento que identifica e analisa as principais estratégias nacionais existentes no continente europeu (ESFERA, 2020). No estudo surgem exemplos como o do Reino Unido, cujo governo disponibilizou 22 milhões de libras para financiamento de projetos de desenvolvimento de combustíveis com reduzido carbono à base de resíduos, direcionados aos transportes aéreos e veículos pesados. Outros países, optaram por estratégias mais ambiciosas, como é o caso da França que em julho de 2019 anunciou que seriam introduzidos impostos às companhias aéreas que operam nos seus aeroportos, sendo que se espera

arrecadar aproximadamente 180 milhões de euros. A França juntou-se também aos Países Baixos para pressionar a EU a implementar impostos sobre os combustíveis para aviação, numa tentativa de abandonar a sua isenção.

Os Países Baixos foram pioneiros nestes impostos. Em 2008 introduziram uma taxa de 11.25 euros em voos dentro da EU e/ou de distâncias menores do que 2500 quilómetros (45 euros a distâncias superiores), mas a legislação foi abandonada um ano mais tarde, após o declínio de passageiros. Recentemente foi proposto um projeto de lei que impõe uma taxa fixa de 7 euros por passageiro.

A Noruega é outra nação pioneira, impondo, às companhias aéreas em operação no seu espaço aéreo, o uso obrigatório de biocombustíveis a começar pela incorporação de 0.5% a partir de 2019. O governo norueguês também definiu como objetivo que 30% dos combustíveis para aviação vendidos em 2030 sejam biocombustíveis. A aposta norueguesa nos SAF começou em 2014, quando o aeroporto de Oslo se tornou o primeiro a oferecer biocombustíveis às companhias aéreas que nele operam, sendo que em 2017 a oferta expandiu-se também ao aeroporto de Bergen (Baxter, Srisaeng and Wild, 2020).

A Suécia é relevante não só por ser um país pioneiro, mas também por ser o país de origem do termo *flygskam*¹³ (Asquith, 2020). À semelhança do Reino Unido, o governo sueco financiará (em 2021 serão investidos cerca de 4 milhões e 600 mil euros) a investigação e o desenvolvimento de projetos que estudem SAF. Existirá também um grupo de inovação constituído por representantes de toda a cadeia de produção de SAF, cujo objetivo será avaliar e propor passos para a aviação sustentável. Em 2019, foi elaborado um relatório, por solicitação do governo, que propõe também a obrigatoriedade do uso de SAF (FlightPath, 2019b). Inicialmente seria exigida a quantidade de 1%, a partir de 2021, em todos os aeroportos que oferecem reabastecimento no país, mais tarde evoluindo para 5% em 2025 e 30% em 2030. O objetivo final seria atingir 100% em 2045.

Finalmente, em Espanha, o ministério do transporte pretende introduzir políticas para atacar as alterações climáticas. A introdução de SAF é vista como vantajosa, especificamente no âmbito da RED II. É importante referir que, à semelhança do grupo de inovação praticado na Suécia, Espanha iniciou diálogos com os principais operadores nacionais na área, concluindo exigir 2% de SAF em 2025.

2.1.3 Nacional

Como referido anteriormente, a abordagem destes temas na aviação internacional é responsabilidade da ICAO e conseqüentemente, do regime CORSIA. Os voos domésticos em Portugal ficam abrangidos pelo regime CELE. Assumindo que os SAF produzidos obedecem aos critérios de sustentabilidade da RED II, então criam-se também créditos que poderão ser negociados no âmbito do regime CELE (ESFERA, 2019). Para além disto, é importante estudar os planos e

¹³ Em português significa vergonha de voar.

estratégias existentes no país, para compreender as oportunidades e barreiras existentes à introdução doméstica de SAF.

O já mencionado PNEC2030 propõe-se alcançar em 2030 uma redução de 45% a 55% das emissões de GEE em relação a 2005. O plano refere incentivos ao investimento de biocombustíveis avançados direcionados aos transportes, que valorizem recursos e resíduos nacionais, promovendo uma economia circular. O plano prevê, tendo em conta a evolução esperada do sector dos transportes em Portugal, que em 2025 se consumam 255 ktep¹⁴ de biocombustíveis de 1ª geração e 94 ktep de biocombustíveis avançados, métricas que atingirão os 136 e 155 ktep, respetivamente, em 2030 (República Portuguesa, 2019^a). Estes valores demonstram a intenção de substituir a produção de biocombustíveis de 1ª geração, considerada prejudicial, por biocombustíveis avançados, sendo sem dúvida benéfica a existência de uma indústria de biocombustíveis já significativa. O plano refere ainda como matéria-prima, culturas energéticas com espécies florestais de muito curta rotação para biocombustíveis de segunda geração, e, paralelamente, biomassas residuais, como por exemplo óleos alimentares usados (OAU).

O RNC2050 deverá funcionar sinergicamente com o PNEC2030. Em ambos, ambiciona-se que os biocombustíveis percam relevância (para a eletrificação) no sector rodoviário, porém a sua relevância no sector da aviação será mantida. No entanto, apesar dos biocombustíveis e do hidrogénio serem considerados os principais drivers na descarbonização do sector dos transportes aéreos, o RNC2050 estima que em voos de distâncias até 1500 quilómetros o avião elétrico se torne viável até 2050 (República Portuguesa, 2019^b).

Em 2017, por solicitação da Secretaria de Estado da Energia, foi elaborado pelo Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG) um Plano Nacional para a Promoção das Biorrefinarias (Pinto *et al.*, 2017). No documento, é exposto o potencial da biomassa na evolução da segurança energética nacional, através das reduções de importações de combustíveis derivados de fontes fósseis, substituídas por futuras cadeias de valor para a produção de biocombustíveis. Em termos legislativos, futuras biorrefinarias de valorização energética, isto é, otimizadas para a produção de produtos bioenergéticos, requererão incentivos políticos estáveis de média e longa duração. Para além disso, como mencionado noutras fontes, as principais despesas na produção de biocombustíveis avançados estão relacionadas com o custo da biomassa, investimento (CAPEX) e operação (OPEX) das biorrefinarias. Neste sentido, oportunidades para diminuir gastos incluem a coprodução de produtos químicos com valor acrescentado e utilização de biomassas residuais de baixo custo. Algumas das vantagens, raramente mencionadas na restante literatura, são a evolução na coesão territorial, criação de emprego qualificado e não qualificado, desenvolvimento de mercados alternativos e aproveitamento do conhecimento prático da indústria papeleira já instalada, sendo que no território continental do país existe um potencial considerável de biomassas residuais e naturais.

O mesmo documento contém ainda uma proposta do roteiro a seguir para implementar o plano. O roteiro estabelece 5 pilares: o estímulo de cadeias de abastecimento de matérias-primas

¹⁴ Quilotonelada equivalente de petróleo, sendo 1 tep equivalente a 42 GJ.

adequadas, o avanço na investigação, desenvolvimento e inovação (I&D&I), o desenvolvimento da tipologia de projetos demonstradores, a monitorização (tecnológica, social e ambiental) e finalmente, a inclusão da sociedade. Ademais, a execução do plano requer também uma estratégia que promova novas cadeias de valor sinergicamente com o desenvolvimento regional. Adicionalmente devem ser seguidos critérios como a utilização de matérias-primas em cascata de valor (ilustrada na figura 5), não competição com mercados de biomassa de maior valor, evasão de centrais elétricas de baixa eficiência, incentivação das tecnologias mais avançadas, abstenção de ILUC e a valorização de resíduos urbanos.



Figura 5 – Princípios de utilização em cascata enquadrada numa economia de biomassa (adaptado (Pinto *et al.*, 2017)).

2.1.4 Identificação de Barreiras e Oportunidades

Após estudadas as estratégias existentes, observam-se diversos obstáculos à introdução de SAF. O custo elevado de produção, sobretudo associado à aquisição de matéria-prima, mas também dependente do capital inicialmente necessário, torna impeditivos os preços dos SAF às companhias aéreas, cuja principal despesa é habitualmente combustível. A este obstáculo associa-se ainda a competição com biodiesel, na medida em que a produção é relativamente mais barata e apoiada por enquadramentos políticos que ainda não são comuns para os SAF.

Diretamente relacionada está a dificuldade sentida por países individuais na criação de políticas nacionais capazes de incentivar a produção de biocombustíveis especificamente para a aviação, traduzindo-se na falta de incentivos para a produção. A ausência de exigências de SAF, nos regimes internacionais como CORSIA e CELE, ou ainda na RED II e no RFS2, é também uma barreira, acrescentando ao problema o facto de que o combustível para aviação não é taxado nos voos internacionais.

Nesta primeira década da indústria, também se identificou uma lentidão na certificação. No entanto, o ritmo da certificação tem acelerado, sendo que à data de início deste trabalho existem 6 cadeias de produção já certificadas, 4 delas a partir de 2014. Existem outras vias de produção em processo de aprovação, 3 delas em estágios avançados (FlightPath, 2019^a).

Em relação às oportunidades existentes, as mais óbvias são a redução de emissões de GEE e de outros poluentes atmosféricos. Existe também a oportunidade de desenvolver iniciativas locais e regionais, que envolvam atores de toda a indústria para estabelecer redes de fornecimento em aeroportos específicos e simultaneamente participar no progresso da economia circular, criando cadeias de valor e postos de emprego. Outra vantagem é a existência e certificação (que tem vindo a acelerar, como referido) da tecnologia, ao que se soma também o precedente da penetração dos biocombustíveis nos transportes rodoviários.

Relativamente aos enquadramentos em estratégias políticas, a introdução de SAF beneficia por ser, se respeitados os respetivos critérios de sustentabilidade, uma alternativa aos regimes CORSIA e CELE. Em relação à RED II, apesar da diretiva não exigir a utilização de SAF, o seu uso é considerado apazível. Os SAF beneficiam também da dificuldade da transformação tecnológica no transporte aéreo a curto-prazo (ao contrário dos transportes rodoviários), pelo que alguns países europeus já estão a dar preferência à exigência destes combustíveis alternativos no transporte aéreo doméstico.

Numa perspetiva nacional, a República Portuguesa desenvolveu o PNEC2030 que incentiva o investimento na produção de biocombustíveis avançados. O facto de já existir indústria de biocombustíveis no país, embora de 1^a geração, é também promissor. Especialmente tendo em conta que se pretende a substituição para biocombustíveis avançados. Além disso, o país beneficiaria também através de uma redução da dependência de matérias-primas importadas, assim como da valorização de recursos, especialmente provenientes de resíduos, endógenos. Isto implica também uma evolução na coesão territorial e na independência energética do país, representando uma mais valia para a segurança nacional.

Em termos económicos, existe a hipótese de que as emissões de GEE provenientes de fontes fósseis sejam progressivamente mais caras, pelo que os SAF poderiam tornar-se opções mais viáveis no futuro. Outra possibilidade é a de redução de custos derivados de inovações tecnológicas na produção em massa de biocombustíveis. Alternativamente, poderá surgir uma introdução de subsídios específicos aos SAF, tornando a sua produção mais atraente.

2.2 Identificação de Potenciais Cadeias de Produção de SAF

A utilização de combustíveis líquidos de origem biológica é uma ideia estabelecida há centenas de anos. Um exemplo inegável é a indústria da caça de cetáceos, motivada em parte pelo espermacete, especialmente proveniente do cachalote, que servia maioritariamente para iluminação,

tendo sido importados mais de 13 milhões de litros deste óleo para os Estados Unidos em 1837 (Tower, 1907). Ironicamente, hoje em dia o óleo de baleia é utilizado como biocombustível para abastecer barcos que ainda participam na indústria de caça à baleia, na Islândia (Hoare, 2013). Atualmente, apesar da baixa penetração, a indústria dos biocombustíveis já está amplamente estabelecida no sector do transporte rodoviário, sendo os mais comuns o bioetanol e o biodiesel.

Geralmente, quando se menciona biocombustíveis, refere-se a combustíveis líquidos produzidos a partir de matérias-primas de biomassa sustentável. A 1ª geração de biocombustíveis, provenientes de biomassa indiferenciadamente, gerou controvérsia devido à competição com a indústria alimentar, utilização de água e alterações no uso da terra (Mawhood *et al.*, 2016). Surgiram então os biocombustíveis avançados que se diferenciam por terem origem em matérias-primas que não rivalizam com a indústria alimentar, como por exemplo resíduos florestais e algas. É comum na literatura encontrar denominações diferentes para combustíveis para a aviação, porém a ICAO utiliza o termo combustíveis sustentáveis para a aviação (SAF).

Os SAF, enquanto combustíveis *drop-in*, têm propriedades semelhantes aos combustíveis tradicionais e assim as emissões da sua combustão serão similares. A principal vantagem dos SAF está nas suas emissões de ciclo de vida, que vão desde a matéria-prima até à combustão, sendo reduzidas comparativamente aos combustíveis derivados de fontes fósseis, caso todo o processo esteja de acordo com as boas práticas da sustentabilidade.

Como aludido na introdução, o primeiro voo realizado com biocombustíveis deu-se em 2008. Desde esse marco que a indústria evoluiu rapidamente. Em 2009, um programa de testes envolveu produtores de combustíveis, empresas fabricantes de motores e companhias aéreas de forma a enfrentar o problema da sustentabilidade na indústria. Nesse estudo, que incluiu voos experimentais, concluiu-se que queroseno parafínico sintetizado a partir de um óleo de origem biológica possui maior densidade energética, sem danificar a aeronave, numa mistura de 50% (Kinder and Rahmes, 2009). No mesmo ano, foi aprovado pela Sociedade Americana de Testes e Materiais (ASTM *International*) a primeira cadeia de produção de um combustível alternativo para a aviação. Hoje, existem 6 processos certificados pela instituição¹⁵, representando 4 famílias de vias de conversão (ICAO, 2019b):

- Queroseno parafínico sintetizado via método *Fischer-Tropsch* (FT-SPK);
- Queroseno parafínico com elevado conteúdo aromático sintetizado via método *Fischer-Tropsch* FT-SPK/A);
- Queroseno parafínico sintetizado a partir de ésteres e ácidos gordos hidroprocessados (HEFA-SPK);
- Combustíveis iso-parafínicos sintetizados a partir de açúcares fermentados hidroprocessados (SIP-HFS);
- Combustível para aviação sintetizado a partir do álcool, especificamente etanol. (ATJ-SPK);

¹⁵ Sendo que a certificação é exigida para maior parte dos voos internacionais.

- Combustível para aviação sintetizado a partir do álcool, especificamente isobutanol. (ATJ-SPK);

Os SAF devem ser combustíveis *drop-in*, neste sentido é importante referir os combustíveis tradicionais para a aviação, baseados em queroseno. Estes combustíveis, devido à natureza da indústria do transporte aéreo, são alvos de exigentes standards de segurança e de qualidade. O standard mais utilizado é o ASTM D1655 que especifica as características dos combustíveis de turbinas na aviação, por exemplo o Jet A-1¹⁶, cujas propriedades se encontram na tabela 1. Após a certificação, a cadeia de produção de SAF é acrescentada, como anexo, ao standard ASTM D7566, o que dada à natureza *drop-in* destes combustíveis, significa também que obedece ao standard ASTM D1655, desde que se obedeça às percentagens recomendadas (Hitchcock, 2019).

Tabela 1 - Propriedades importantes no combustível tradicional para aviação comercial (adaptado) (Vásquez, Silva and Castillo, 2017).

Propriedade	Limite	Jet-A1
Conteúdo aromático (% volume)	Máximo	26.5%
Ponto de inflamação (°C)	Mínimo	38
Densidade a 15°C (kg/m ³)	Min.	775-840
Ponto de solidificação (°C)	Max.	-47
Viscosidade a -20°C (mm ² /s)	Max.	8.0
PCI (MJ/kg)	Min.	42.8

Apesar da natureza *drop-in* destes combustíveis alternativos, poderão ser compostos por diferentes moléculas. Assim, a caracterização tanto do seu desempenho como das suas emissões é interessante. A poluição atmosférica resultante da indústria da aviação não está limitada ao dióxido de carbono. Para além deste, e da poluição sonora (para lá dos objetivos deste trabalho), existem outras moléculas problemáticas como óxidos de azoto (NO_x), monóxido de carbono (CO) e hidrocarbonetos. Estes poluentes atmosféricos são relevantes pois são nefastos para a saúde pública, especialmente na proximidade de aeroportos. Neste contexto, grande parte dos SAF aprovados pela ASTM *International* revelam simultaneamente melhorias de desempenho e diminuições na emissão destes poluentes (Pereira Gaspar, 2016). Outros estudos, com extensivos voos de demonstração indicam uma diminuição de 1% no consumo de combustível e uma diminuição de 50% nas partículas inaláveis (PM, do inglês *Particulate Matter*) emitidas (ITAKA, 2016).

2.2.1 FT-SPK e FT-SPK/A

Em 2009 a ASTM aprovou a certificação do queroseno parafínico sintetizado via método Fischer-Tropsch (FT-SPK). Segundo o standard ASTM D7566, os combustíveis produzidos a partir desta processo podem ser misturados numa quantidade até 50% (em volume) com os combustíveis tradicionais (Hitchcock, 2019). O processo pode ser iniciado através das seguintes matérias-primas: carvão, gás natural e biomassa (Pereira Gaspar, 2016), sendo naturalmente preferível utilizar

¹⁶ O Jet A-1 é utilizado no resto do mundo, enquanto que o Jet A é utilizado nos EUA. A principal diferença entre os dois é o ponto de congelamento, o primeiro é de -47°C e o segundo -40°C (Air BP, 2000).

matérias-primas provenientes de biomassa sustentável. No contexto deste trabalho, exemplos de matérias-primas utilizáveis englobam resíduos agrícolas e florestais, culturas energéticas e resíduos urbanos.

Após o pré-tratamento adequado da matéria-prima, o processo implica a gaseificação da biomassa a altas temperaturas de modo a obter uma mistura de gases. Devido à presença de contaminantes, como por exemplo metais alcalinos, segue-se a purificação e o gás de síntese é convertido, através de uma reação catalítica (síntese FT), numa mistura de líquidos e gases com cadeias de hidrocarbonetos de diferentes tamanhos e, dependendo dos parâmetros da reação e da refinação, pode produzir-se combustível apropriado para aviação (ICAO, 2018).

A síntese FT, um processo inventado em 1925 na Alemanha, é realizada com recurso a um catalisador, geralmente metálico¹⁷, para fazer reagir¹⁸ o hidrogénio e o monóxido de carbono dando origem a hidrocarbonetos líquidos (E4Tech, 2009). Após a síntese FT, o produto bruto é refinado e separado em produtos individuais, pertencendo o combustível para a aviação ao grupo dos vários produtos obtidos (Pereira Gaspar, 2016).

Os combustíveis à base de queroseno parafínico sintetizado (SPK) não possuem, por si só, a quantidade mínima de conteúdo aromático¹⁹, pelo que surgiu o interesse em desenvolver queroseno parafínico sintético com elevado conteúdo aromático (SPK/A), também via FT, de modo a que seja possível aumentar a percentagem de SAF utilizada (Torres, 2014). Em 2015, esta cadeia de produção foi aprovada pela ASTM *International*, anexo 5 do standard ASTM D7566, e, embora esteja limitada a uma mistura de 50% (em volume), poderá ser uma direção a seguir para eventualmente alcançar os 100% (ICAO, 2018).

2.2.2 HEFA-SPK

Os ésteres e ácidos gordos hidroprocessados também podem ser convertidos em SPK (HEFA-SPK), num processo aprovado em 2011 pelo standard ASTM D7566, anexo 2 (Hitchcock, 2019). O standard permite uma quantidade volumétrica de 50% na mistura de combustível e as matérias-primas englobam bio-óleos, gorduras animais e outro óleos recicláveis como por exemplo o OAU (ICAO, 2018). A conversão exige, após o pré-tratamento da biomassa, um complexo hidroprocessamento formando hidrocarbonetos que posteriormente são refinados para atingir as propriedades necessárias para obedecer ao standard (Pereira Gaspar, 2016). Esta cadeia de produção é responsável pela maior parcela dos biocombustíveis para a aviação produzidos atualmente, contudo a mesma cadeia produz biodiesel, pelo que a produção do último acaba por ser favorecida devido ao baixo custo de produção e ao mercado já amplamente estabelecido (IRENA, 2017). Ademais, o avanço do HEFA-SPK, e da respetiva via de conversão, é notável pois este SAF já

¹⁷ Cobalto e ferro são os mais comuns (Sikarwar *et al.*, 2017)

¹⁸ A reação acontece a pressões entre 20-40 bar e a temperaturas entre os 200-250°C ou 300-350°C.

¹⁹ 8.4%, em combustíveis para aviação (European Commission, 2013).

foi utilizado para que pela primeira vez fossem utilizadas misturas entre SAF e combustíveis tradicionais nas infraestruturas de um aeroporto (ITAKA, 2016).

2.2.3 SIP-HFS

O anexo 3 do standard ASTM D7566, incorporado em 2014 diz respeito aos combustíveis iso-parafínicos sintetizados a partir de açúcares fermentados hidroprocessados (SIP-HFS) e indica que a sua utilização só é permitida até frações volumétricas de 10% (Hitchcock, 2019). A causa desta limitação é a inaptidão do produto (*farnesane*), diferente dos típicos hidrocarbonetos, em relação às especificações do standard (Pereira Gaspar, 2016). Como o nome indica, esta via envolve a fermentação biológica de açúcares, através de microrganismos, produzindo *farnesene*, que depois é reagido com hidrogénio para gerar *farnesane* (IRENA, 2017). A matéria-prima utilizada necessita de conter açúcares, pelo que exemplos são biomassa lignocelulósica como resíduos florestais e agrícolas, ou ainda culturas energéticas (ESFERA, 2019).

2.2.4 ATJ-SPK

A quinta adição (anexo 5) ao standard ASTM D7566 foi a produção de queroseno parafínico sintetizado a partir de álcool (ATJ-SPK), especificamente o isómero de butanol, isobutanol. Esta via foi aprovada em 2016 e inicialmente era permitida uma fração volumétrica de 30% na mistura (Hitchcock, 2019). No entanto, em 2018 foi aprovada a utilização de outro álcool, o etanol, e foi aumentada para 50% a fração volumétrica permitida (Lanzatech, 2018). Tanto para o etanol como para o isobutanol existem diversas matérias-primas, desde o milho e a cana-de-açúcar até a resíduos sólidos urbanos.

Após pré-tratamento apropriado para a biomassa utilizada, ocorre num tanque a fermentação do respetivo álcool via microrganismos, no caso do isobutanol, estirpes de *Escherichia coli* e *Saccharomyces cerevisiae* aperfeiçoadas para melhor tolerar o butanol²⁰ à medida que este é produzido (Roussos *et al.*, 2019). O próximo passo requer a desidratação, formando-se um gás olefínico que sofre posteriormente oligomerização para compostos com pesos moleculares superiores, seguindo-se a hidrogenação (Pereira Gaspar, 2016). Finalmente, o produto é refinado para que as suas propriedades obedeçam ao standard.

2.2.5 Alternativas aos SAF

Dada a urgência com que, tanto a indústria como a opinião pública adotaram em tornar a aviação global mais sustentável, é preciso explicitar as razões pelas quais os SAF são a melhor opção no curto-médio prazo. É então importante, no contexto deste trabalho, fazer uma breve análise

²⁰ O etanol não é tão tóxico para os microrganismos, pelo que é relativamente mais fácil fermentar.

a formas alternativas de alimentar a indústria da aviação, aprofundando um pouco mais o que foi descrito na introdução.

Tendo em conta que os aviões vendidos hoje durarão em média 25 anos e que existem encomendas à escala de uma década, é seguro afirmar que a atual infraestrutura não será abandonada arbitrariamente, especialmente no curto-prazo. Embora isso seja uma vantagem dos SAF, pela sua natureza *drop-in*, a transição energética implica inovação e, formas alternativas de energia final como hidrogénio e eletricidade, por exemplo, poderão representar o futuro da indústria da aviação.

A natureza do sector dos transportes implica que um dos principais fatores limitantes na transição energética seja a densidade energética. A figura 6 (dados obtidos da literatura (Gray *et al.*, 2021) (Wang *et al.*, 2016)) mostra como algumas das formas de energia alternativas mais populares para o sector, como as baterias e o hidrogénio, se afastam das densidades energéticas características dos combustíveis fósseis. Enquanto que a densidade energética gravimétrica das baterias implica, de momento, a sua exclusão como forma viável de energia final nos voos de longa duração, o hidrogénio, tanto criogénico como comprimido, tem uma densidade energética gravimétrica superior à dos combustíveis fósseis atualmente utilizados pela indústria. No entanto, a baixa densidade energética volumétrica do hidrogénio, mesmo criogénico e comprimido, implica que qualquer aeronave que o venha utilizar seja muito diferente das atuais, dado que seria necessário desenvolver novas formas de o armazenar durante os voos. Isto indica que qualquer dessas alternativas implicaria uma nova infraestrutura, tanto das aeronaves como da logística da energia final escolhida.

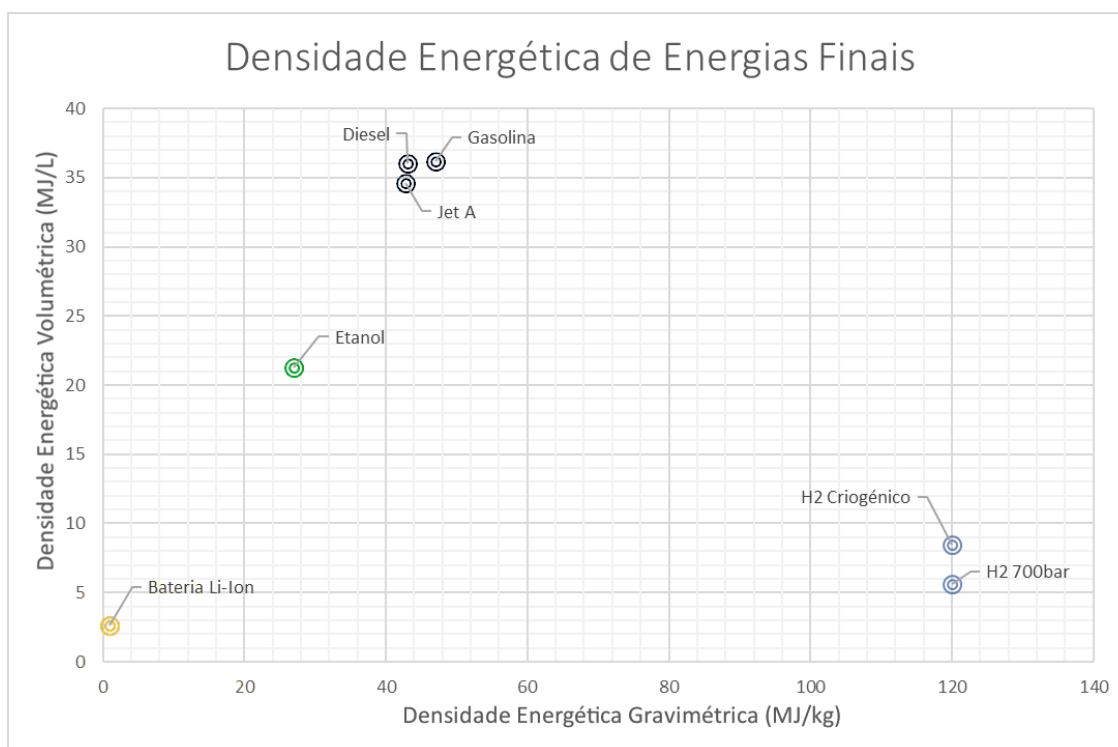


Figura 6 - Densidades energéticas volumétricas e gravimétricas de formas alternativas de energia final para o sector dos transportes.

A dificuldade no *design* e implementação desta infraestrutura está diretamente relacionada com a escala do veículo. Um automóvel leve é obviamente mais fácil de “eletrificar” do que um avião comercial, dado que a mesma quantidade de energia para alimentar o voo requereria uma massa muito mais elevada, o que por sua vez representaria um balanço mássico e energético negativo. Por isso, não é surpreendente que os carros elétricos sejam cada vez mais competitivos enquanto que os aviões elétricos sejam esperados, na melhor das hipóteses, em 2050 e limitados aos voos até 1500 quilómetros (República Portuguesa, 2019b). Em relação ao hidrogénio, apesar da mais favorável densidade energética gravimétrica, devido à desfavorável densidade gravimétrica volumétrica, na melhor das hipóteses, poderia alimentar aeronaves de médio-curso e longo-curso a partir de 2035 e 2040, respetivamente (McKinsey & Company, 2020).

Felizmente, a utilização de biocombustíveis sintéticos permite reduzir, embora que parcialmente, as emissões derivadas da infraestrutura de transportes já existente. Pelo menos enquanto a transição para outras formas de energia final é executada. Sendo assim, a utilização de resíduos à base de biomassa para a produção de combustíveis relativamente mais sustentáveis e quimicamente semelhantes aos derivados fósseis (combustíveis *drop-in*), é uma solução tecnológica que não pode de forma alguma ser ignorada na maratona civilizacional até à sustentabilidade.

2.2.6 Análise do Estado da Arte dos SAF

Estando claras as vantagens da implementação dos SAF na atual infraestrutura da indústria da aviação, resta compreender o atual estado da arte da sua produção. Assim, esta secção trata primeiramente de apurar quais as famílias de vias de conversão de SAF mais promissoras para as circunstâncias nacionais. No contexto deste estudo, importa ter como critério a viabilidade tecnológica e económica, mas também as emissões de GEE. A figura anexada 1, no anexo 1, esquematiza e a tabela 2 sintetiza as vias de conversão aprovadas até este momento. Segue-se o enquadramento das vias de conversão num contexto de viabilidade e de emissões de GEE.

Entre as quatro famílias de vias de conversão certificadas pela ASTM *International* é agora importante identificar as mais adequadas para implementação a curto-prazo tendo em conta as circunstâncias nacionais. Relativamente à tecnologia, aplicar uma abordagem por níveis de prontidão do combustível (FRL, do inglês de *Fuel Readiness Level*²¹) é útil para clarificar a condição das cadeias de produção. A tabela 3 aborda a escala utilizada pela Iniciativa dos Combustíveis Alternativos para a Aviação Comercial (CAAFI, do inglês *Commercial Aviation Alternative Fuels Initiative*) e a tabela 4 indica o atual FRL das 4 famílias de vias de conversão (CAAFI, 2019). A escala utilizada é útil e bastante difundida, mas tem defeitos como a hipótese de a certificação surgir antes da central de demonstração (Mawhood *et al.*, 2016).

²¹ Baseada na famosa escala de níveis de prontidão de tecnologia da NASA.

Tabela 2 – Vias de conversão aprovadas pela ASTM *International* (adaptado) (ICAO, 2018).

Anexo do Standard ASTM D7566	Processo de Conversão	Ano de Aprovação	Matérias-primas	Percentagem volumétrica na mistura final da combustão	Propostas de Comercialização ²²
1	FT-SPK (FT-SPK/A) Fischer-Tropsch	2009 (2015)	Carvão, gás natural e biomassa	50%	Fulcrum BioEnergy, Red Rock Biofuels, SG Preston, Kaidi, Sasol, Shell, Syntroleum, (Sasol)
2	HEFA-SPK Ésteres e Ácidos Gordos Hidroprocessados	2011	Óleos vegetais, gordura animal e óleos reciclados	50%	World Energy, Honeywell UOP, Neste Oil, Dynamic Fuels, EERC
3	SIP-HFS Açúcares Fermentados Hidroprocessados	2014	Biomassa	10%	Amyris, Total
4	ATJ-SPK Sintetização a partir de álcoois	2016	Biomassa	50%	Gevo, Cobalt, Honeywell UOP, Lanzatech, Swedish Biofuels, Byogy

Tabela 3 – Escala FRL definida pela CAAFI (adaptado) (Mawhood *et al.*, 2016).

Estado da arte	FRL	Descrição	Requisitos
I&D	1	Princípios básicos	<ul style="list-style-type: none"> Matéria-prima e princípios básicos identificados
	2	Conceito tecnológico formulado	<ul style="list-style-type: none"> Matéria-prima e processos completamente identificados
	3	Prova conceptual	<ul style="list-style-type: none"> Amostra de laboratório obtida a partir de uma matéria-prima realística Análises de balanços de energia para análises ambientais Propriedades básicas do combustível validadas
	4	Avaliação técnica preliminar	<ul style="list-style-type: none"> Análise do desempenho e integração dos sistemas Propriedades específicas avaliadas
	5	Validação do processo	<ul style="list-style-type: none"> Central de demonstração
Processo de certificação	6	Avaliação técnica completa	<ul style="list-style-type: none"> Testes para a certificação ASTM incluindo testes em reatores
	7	Certificação	<ul style="list-style-type: none"> Certificação internacional
Implementação Comercial	8	Comercialização	<ul style="list-style-type: none"> Modelo de negócios validado Acordos com companhias aéreas Análise de GEE emitidos especificamente na central
	9	Produção estabelecida	<ul style="list-style-type: none"> Central comercial operacional

A partir da tabela 4 é possível inferir que a via SIP, que diz respeito aos combustíveis iso-parafínicos sintetizados a partir de açúcares fermentados hidroprocessados, aparenta sofrer de estagnação no seu desenvolvimento tecnológico, o que explica também a dificuldade em encontrar, na literatura, informação sobre esta via de produção. Uma possível causa para a ausência de

²² Entre as propostas de comercialização existem algumas já em operação.

avanços significativos é o limite de 10% na mistura com o combustível de origem fóssil e a competição, em termos de matérias-primas (açúcares fermentáveis e hidrogénio), com a via de conversão ATJ que permite atingir uma mistura de 50%, sendo assim um investimento relativamente mais interessante. Assim, a via SIP será desconsiderada neste trabalho.

Tabela 4 – FRL das famílias de produção de SAF certificadas pela ASTM.

Famílias de vias de produção	2015 (Mawhood <i>et al.</i> , 2016)	2016 (Alves <i>et al.</i> , 2016)	2021
FT-SPK	7-8	7-8	8
HEFA-SPK	6-9	8	9
SIP-HFS	5-7	7-8	7
ATJ-SPK	4-6	6	8

Em relação aos GEE, a ICAO define um mínimo de redução destes gases em 10% por comparação aos combustíveis de origem fóssil, enquanto que a RED II define uma redução mínima de 65%, pelo que no âmbito deste trabalho a alternativa mais ambiciosa definirá o limite mínimo. A tabela 5 exhibe quantidades referência de emissões de GEE para as vias de conversão em implementação comercial, assim como as respetivas reduções em percentagem quando comparadas com o valor padrão do combustível definido pela ICAO de 89 g CO_{2e}/MJ. Ao observar a tabela torna-se inequívoco que as vias de conversão FT e HEFA podem ser implementadas de acordo com as imposições da RED II. Não obstante, eventuais melhorias tecnológicas na via dos álcoois poderão permitir maiores reduções de emissões o que tornaria essa via de conversão atrativa, tendo em conta o quão próxima está de atingir o mínimo de 65%.

Tabela 5 – Valores padrão de emissões de GEE das vias de produção em implementação comercial (adaptado) (Sustainable Aviation, 2020).

Vias de produção	Emissões de GEE (g CO _{2e} /MJ)	Redução (%)	Matéria-prima
FT-SPK	13.7	84.6	Resíduos de madeira
HEFA-SPK	14.0	84.3	OAU e gorduras animais
ATJ-SPK	35.0	60.7	Sobrantes de milho

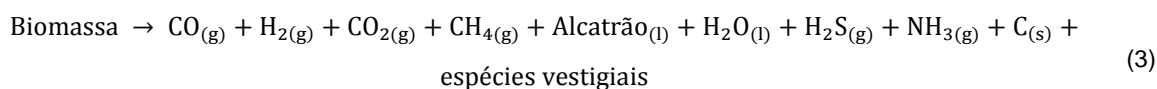
Assim, é pertinente aprofundar as diferentes tecnologias que integram estas três vias de conversão. Nas próximas subsecções é analisado o estado da arte da gaseificação, do hidroprocessamento, da síntese de álcoois, desidratação catalítica, oligomerização e hidrogenação.

2.3 Estado da Arte da Produção de SAF

2.3.1.1 Gaseificação

A gaseificação, mencionada acima, é uma das metodologias utilizadas, depois do pré-tratamento da matéria-prima, tanto na produção de FT-SPK como de ATJ-SPK (opcionalmente), esquematizadas na figura 7. É um processo termoquímico, que permite transformar matéria com conteúdo carbónico num gás com elevado conteúdo energético, implica a combustão parcial do

material a altas temperaturas²³ de modo a obter uma mistura de gases, chamada gás de síntese (do inglês, *syngas*) (Arena, 2012). Embora a gaseificação industrial de carvão e gás natural esteja já amplamente estabelecida (Zschocke and Scheuermann, 2012), no contexto deste trabalho é mais relevante a gaseificação da biomassa. A gaseificação combina processos como a secagem, pirólise, oxidação parcial e redução. A oxidação parcial é executada na presença de uma quantidade de oxidante inferior à exigida para uma combustão estequiométrica, durante a qual o material orgânico sofre conversão para maioritariamente monóxido de carbono (CO) e hidrogénio (H₂), embora possa conter também metano (CH₄), CO₂, carvão e alcatrão, de acordo com a simplificação de todo o processo, contida na equação 3 (Sikarwar *et al.*, 2017).



Embora a simplificação representada na equação 3 seja útil na compreensão geral da transformação da biomassa após a gaseificação, pouco esclarece o processo. A tabela 6 é um aprofundamento das várias reações que se dão e, apesar de ser baseada especificamente em resíduos urbanos, as equações químicas aplicam-se e são utilizadas extensamente na literatura referente a outras formas de biomassa. No início da gaseificação, dá-se a secagem, com o objetivo de reduzir a humidade da matéria-prima. Nesta etapa é possível reutilizar algum do calor perdido durante todo o processo. Segue-se a pirólise onde a biomassa sofre decomposição térmica, entre 250 a 800 °C, na ausência de qualquer agente oxidante. Durante a pirólise ocorrem as reações de reforma a vapor, reforma a seco, desidrogenação e carbonização (Castanheira, 2017). Após a introdução de um agente oxidante, é iniciada a oxidação parcial. Devido à presença de oxidante, as reações deixam de ser maioritariamente endotérmicas, como se verifica durante a pirólise, e passam a ser exotérmicas, atingindo-se as elevadas temperaturas da gaseificação. Finalmente, ocorre a redução, onde se observam as reações de água-gás, *water-gas shift*, reforma de metano a vapor e Boudouard (Castanheira, 2017).

Existem diversos reatores de gaseificação, incluindo: gaseificadores de leito fixo com escoamento ascendente ou descendente, gaseificador com combustível arrastado (EF, do inglês *Entrained Flow*), gaseificador de leito fluidizado (BFB, do inglês *Bubbling Fluidized Bed*), gaseificador de leito fluidizado circulante (CFB, do inglês *Circulating Fluidized Bed*), gaseificador de duplo leito fluidizado (DFB, do inglês *Double Fluidized Bed*) e gaseificador de plasma, esquematizados na figura 9. Os tipos de reator diferem maioritariamente tanto no método de introdução da biomassa e de agente oxidante, como na movimentação da biomassa e do leito durante o processo. A figura 8 exhibe os principais tipos de gaseificador, representando a diferenciação através dos seus leitos.

Em relação ao oxidante, uma opção óbvia é o ar, que, embora barato, acarreta elevados teores de azoto, comprometendo o produto da reação. Alternativas incluem vapor, uma mistura de

²³ 800°C – 1200°C (Matsakas *et al.*, 2017)

vapor com oxigênio, oxigênio puro (mais dispendioso) e ar com uma fração elevada de oxigênio. A fonte de calor da reação pode ser a fase de oxidação parcial da biomassa ou uma fonte externa (E4Tech, 2009).

É exequível a combinação de múltiplas condições operacionais com qualquer gaseificador, pelo que numerosas composições de gás de síntese podem ser obtidas (Matsakas *et al.*, 2017). Neste âmbito, é pertinente compreender as composições desejadas para introduzir seja na síntese FT ou na síntese de álcoois via fermentação de gás de síntese. Os requisitos pós-gaseificação para a síntese FT incluem uma razão molar adequada de hidrogénio para monóxido de carbono (H_2/CO), estando este parâmetro dependente do catalisador metálico²⁴ a ser utilizado no processo FT. Todavia, é possível corrigir a razão molar, caso seja inferior à requerida, através de reações *water-gas shift*. Adicionalmente, os conteúdos sulfúricos devem ser baixos²⁵, uma vez que diminuem a atuação dos catalisadores, pretendendo-se um equilíbrio entre a limpeza do gás de síntese e o tempo-de-vida do catalisador. Outro requisito é que o alcatrão esteja em concentrações inferiores a 10 ppb. Em relação aos outros gases resultantes, o azoto e o metano são infrutíferos e por isso, indesejados (E4Tech, 2009).

Tabela 6 – Principais reações durante a gaseificação de resíduos urbanos (adaptado) (Arena, 2012).

Grupo de Reações	Nome da Reação	Equação Química	ΔH (MJ/kmol)
Reações de oxidação	Oxidação parcial de C	$C + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO$	-111
	Oxidação parcial de CO	$CO + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO_2$	-283
	Oxidação de C	$C + O_2 \rightarrow CO_2$	-394
	Oxidação de H_2	$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$	-242
	Oxidação de C_nH_m	$C_nH_m + \frac{n}{2}O_2 \rightarrow nCO_2 + \frac{m}{2}H_2$	Exotérmica
Reações com vapor	Reação água-gás	$C + H_2O \leftrightarrow CO + H_2$	+131
	<i>Water-gas shift</i>	$CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2$	-41.1
	Reforma de CH_4 a vapor	$CH_4 + H_2O \leftrightarrow CO + 3H_2$	+206
	Reforma a vapor	$C_nH_m + nH_2O \leftrightarrow nCO_2 + \left(n + \frac{m}{2}\right)H_2$	Endotérmica
Reações com H_2	Hidrogaseificação	$C + 2H_2 \leftrightarrow CH_4$	-75
	Metanação	$CO + 3H_2 \leftrightarrow CH_4 + H_2O$	-222
Reações com CO_2	Boudouard	$C + CO_2 \leftrightarrow 2CO$	+172
	Reforma a seco	$C_nH_m + nCO_2 \leftrightarrow 2nCO_2 + \frac{m}{2}H_2$	Endotérmica
Reações de decomposição de alcatrões e hidrocarbonetos ²⁶	Desidrogenação	$pC_xH_y \leftrightarrow qC_nH_m + rH_2$	Endotérmica
	Carbonização	$C_nH_m \leftrightarrow nC + \frac{m}{2}H_2$	Endotérmica

²⁴ Para Co a razão deverá ser 2 e para o Fe pode estar entre 0.6 e 1.7.

²⁵ 10-100 ppb.

²⁶ Nesta tabela, C_nH_m refere-se a hidrocarbonetos e C_xH_y a alcatrões, hidrocarbonetos mais pesados, resultantes da decomposição térmica da biomassa.

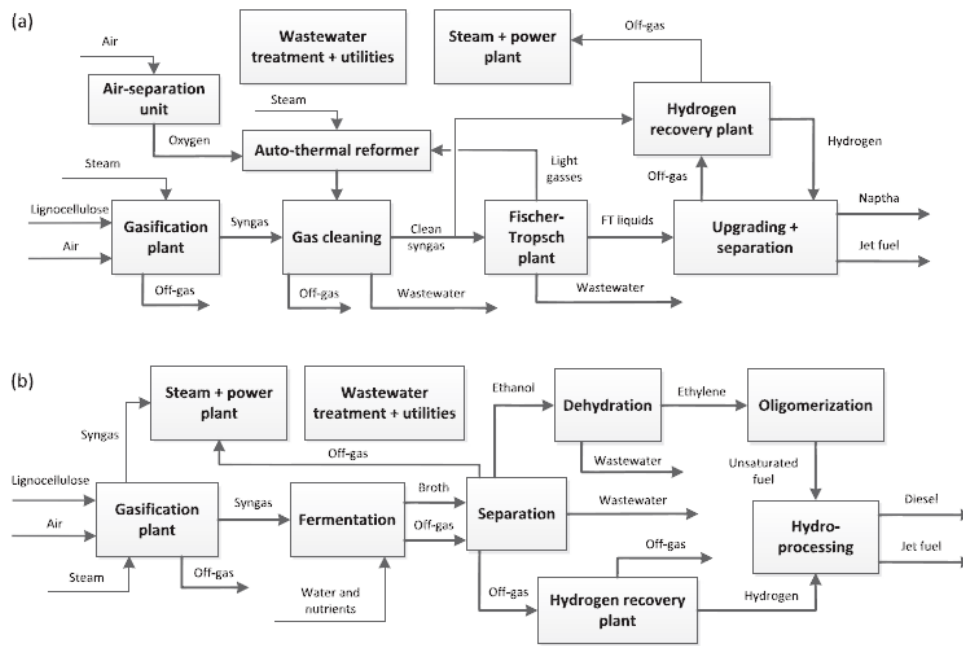


Figura 7 - Esquema com exemplos de produção FT (a) e via álcoois (b), de combustíveis através da gaseificação de material lignocelulósico (Diederichs *et al.*, 2016).



Figura 8 - Principais tipos de gaseificador.

No que diz respeito à fermentação do gás de síntese para a produção de álcoois, são utilizados microrganismos como por exemplo: *Acetobacterium woodii*, *Butyribacterium methylotrophicum*, *Clostridium carboxidivorans P7*, *Eubacterium limosu*, *Moorella* e *Peptostreptococcus productus*. Os requisitos para este processo implicam valores de alcatrão semelhantes aos dos exigidos para a síntese FT e uma razão molar H_2/CO entre 1 e 2, não sendo esta tão importante porque os microrganismos executam melhor a sua atividade em ambientes ricos em monóxido de carbono (E4Tech, 2009). No contexto dos requisitos da gaseificação para a produção de biocombustíveis, a limpeza do gás de síntese não só é importante de um ponto de vista ecológico como também estritamente necessária para atingir as imposições tanto da síntese FT como da fermentação.

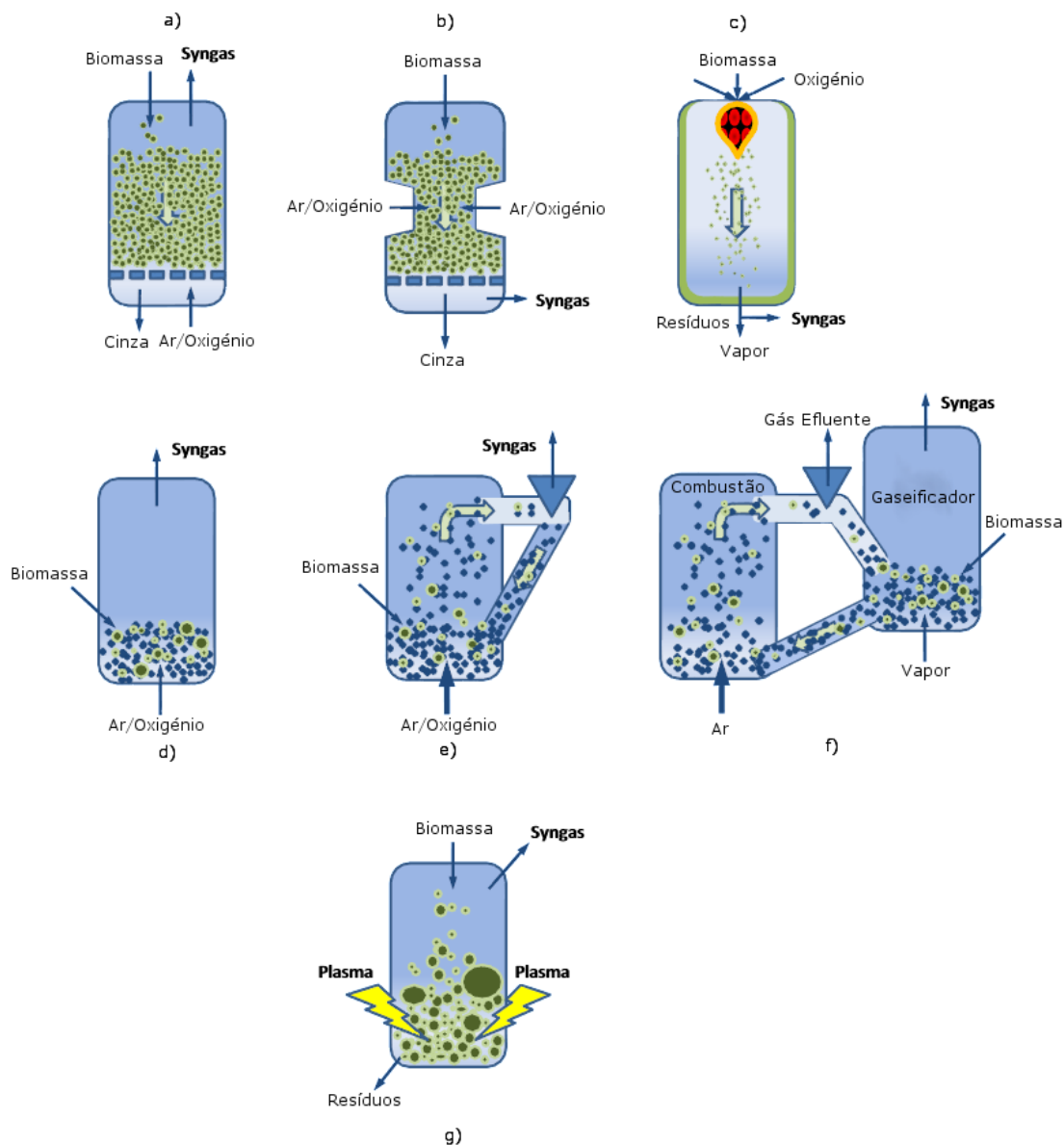


Figura 9 - Tipos de gaseificadores. A) escoamento ascendente b) escoamento descendente c) EF d) BFB e) CFB f) DFB g) plasma. (adaptado) (E4Tech, 2009).

Contrariamente, a engenharia da gasificação não está apenas dependente do que é desejado a jusante, mas também da matéria-prima a montante da operação. Neste aspeto, a humidade, referida anteriormente, é o fator mais importante (Sikarwar et al., 2017). Acrescentam-se ainda os alcatrões, relativamente à quantidade e à composição química do gás de síntese que será produzido, o tamanho das partículas da matéria-prima, o seu custo e o seu teor de cinzas. Dadas as inúmeras variações entre os requisitos de reatores, estes fatores são brevemente caracterizados na tabela 7 em função dos seus valores máximos e mínimos, e respetivos gaseificadores.

Ademais, a matéria-prima afeta também o conteúdo energético do gás produzido, a composição do mesmo e a eficiência do processo (devido ao teor de humidade). Na tabela 8, madeira é comparada com carvão nestes aspetos, uma justaposição oportuna dada a ampla comercialização

da gaseificação de carvão. É interessante notar que do carvão resulta um gás de síntese mais rico em monóxido de carbono, ao contrário dos valores elevados de hidrogénio e de CO₂ resultantes da madeira, reforçando também a influência da humidade no processo.

Tabela 7 - Caracterização comum de fatores importantes relativos à matéria-prima utilizada via gaseificação (adaptado) (Chowdhury, 2014), (Arena, 2012).

Fatores	Valores mínimos	Valores máximos
Teor de alcatrão (g/Nm ³)	0.015-3.0 (escoamento descendente)	30-150 (escoamento ascendente)
Tamanho das partículas (mm)	<0.15 (EF)	6-100 (ascendente)
Teor de humidade (%)	<15 (EF)	<55 (BFB)
Teor de cinzas (% bs)	<5 (descendente)	<25 (CFB)

Tabela 8 – Comparação²⁷ entre as características do syngas obtido da gaseificação de madeira e carvão referente à gaseificação (adaptado) (Castanheira, 2017).

Biomassa	PCS (MJ/kg)	PCI (MJ/m ³)	CO (z%)	H ₂ (z%)	CH ₄ (z%)	CO ₂ (z%)	N ₂ (z%)	Teor de Humidade (%)
Madeira	10-20	5-5.9	17-22	12-20	2-3	9-15	50-54	10-60
Carvão	25-32	4.5-5.6	28-32	4-10	0-2	1-3	55-65	1-10

Entre as condições de operação que influenciam o syngas resultante estão a temperatura, o tempo de residência, o agente oxidante utilizado e a razão de equivalência (Castanheira, 2017). Os intervalos de temperatura do processo são consistentes entre os vários tipos de reatores, enquanto que os tempos de residência são específicos aos leitos utilizados (Chowdhury, 2014). A razão de equivalência, definida na equação 4, está geralmente entre 0.25 e 0.50 e a figura 10 mostra o seu efeito sobre o syngas (Arena, 2012).

$$\phi = \frac{(R_{ar/combustível})_{real}}{(R_{ar/combustível})_{estequiométrica}} \quad (4)$$

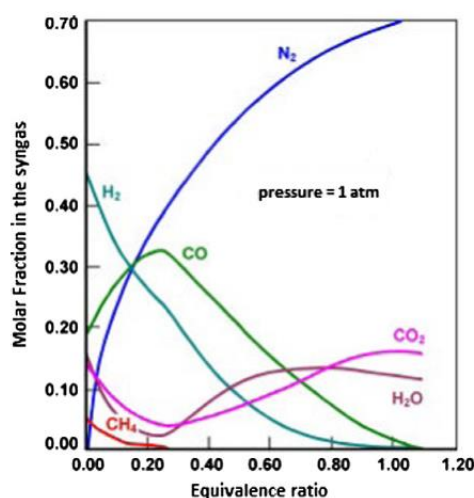


Figura 10 – Frações molares do syngas em função da razão de equivalência (Arena, 2012).

²⁷ É importante referir que a elevada composição de azoto resulta da utilização de ar atmosférico como agente oxidante.

Por forma a assimilar as características energéticas da gaseificação segue-se a introdução das eficiências. Estas são a CGE (do inglês, *cold gas efficiency*), HGE (do inglês, *hot gas efficiency*) e a CCE (do inglês, *carbon conversion efficiency*), definidas nas equações 5, 6 e 7, respetivamente (Arena, 2012). CGE refere-se à razão entre a energia contida no gás de síntese e a energia existente na biomassa. HGE acrescenta à CGE o calor resultante da combustão tanto do gás de síntese como da biomassa. CCE é uma medida da fração de material (carbono) não convertido durante o processo. Os intervalos de valores comuns para estas eficiências encontram-se na tabela 9. A tabela 10 relaciona a HGE e os poderes caloríficos inferiores com as potências de alguns gaseificadores.

$$CGE = \frac{\dot{m}_{syngas} \cdot PCI_{syngas}}{\dot{m}_{biomassa} \cdot PCI_{biomassa}} \quad (5)$$

$$HGE = \frac{Q_{out} + \dot{m}_{syngas} \cdot PCI_{syngas}}{Q_{in} + \dot{m}_{biomassa} \cdot PCI_{biomassa}} \quad (6)$$

$$CCE = \frac{\dot{m}_{carbono(syngas)}}{\dot{m}_{carbono(biomassa)}} \quad (7)$$

Tabela 9 – Eficiências típicas na gaseificação de resíduos urbanos utilizando ar enriquecido com oxigênio (adaptado) (Arena, 2012).

Parâmetros	Mínimo	Máximo
CGE (%)	50	80
CCE (%)	90	99
MJ/kg _{resíduo}	7	18

Tabela 10 – Parâmetros energéticos dos principais tipos de gaseificadores (adaptado) (Chowdhury, 2014).

Parâmetro/Reator	Escoamento Descendente	Escoamento Ascendente	BFB	CFB	DFB	EF
PCI (MJ/Nm ³)	4.5-5	5-6	3.7-8.4	4.5-13	5.6-6.3	4-6
HGE (%)	15-90	90-95	89	89	90-95	80
Potência (MW _e)	<1	<10	2-5	5-100	2-50	>100

Em relação aos custos, apesar do precedente da indústria de gaseificação de carvão e gás natural, a gaseificação de biomassa de forma lucrativa tem sido problemática (Lu e Herzog, 2015). O mesmo relatório produziu um resultado útil indicando que as economias de escala atingem o seu ponto ótimo quando a biorrefinaria atinge 20000 barris diários (perto dos 80 milhares de toneladas de combustível por mês, tratando-se de combustível a jato), devido aos custos da logística da biomassa ao seu redor. Um estudo inovador analisou uma biorrefinaria (cujo gaseificador era DFB) com uma potência de 20 MW_{biometano}, posteriormente injetado na rede de gás natural sueca (Alamia, 2017). Dadas as dimensões do projeto, os dados económicos levantados são relevantes e os custos do gaseificador estão na tabela 11.

Outro estudo importante e completo, desta vez um gaseificador BFB com potência de 2 MW_e, torna claro que a gaseificação, em escala reduzida, via ar atmosférico poderá ser lucrativa com matéria-prima de baixo custo (Porcu et al., 2019). O custo total do gaseificador foi de 9864400 euros. Finalmente, a tabela 12 explicita a dificuldade em desenvolver uma biorrefinaria de FT via gaseificação à escala comercial, dado o número reduzido de projetos em desenvolvimento e as inúmeras falências achadas na literatura.

Tabela 11 – Lista de custos de um módulo de gaseificação de 20 MW (adaptado) (Alamia, 2017).

Secções da Gaseificação	Custo (M€)
Alimentação de Combustível	8.25
Gaseificador	11
Arrefecimento de <i>syngas</i> , filtro e <i>scrubber</i>	4.5
Limpeza de gases efluentes	8.25
Total	32

Tabela 12 – Biorrefinarias comerciais de síntese FT via gaseificação de biomassa (Red Rock Biofuels, 2020) (Fulcrum Bioenergy, 2020) (Alt Alto, 2020).

Organizações	Localidade	Ano	Empregos permanentes gerados	Matéria-prima	Input (toneladas/ano)	Output (milhões de galões/ano)
Red Rock Biofuels	Estado de Oregon, EUA	2020	151	Resíduos de biomassa lenhosa	136000	15.1
Sierra Biofuels, Fulcrum BioEnergy	Estado de Nevada, EUA	2021	120	RSU	175000	11
Alt Alto: British Airways, Velocys e Shell	Immingham, Reino Unido	2025	100	RSU	500000	20

2.3.1.2 Hidroprocessamento

A grande vantagem do hidroprocessamento é a possibilidade de adaptar a infraestrutura das refinarias de combustíveis fósseis atuais para a produção de HEFA-SPK, permitindo a produção deste combustível em lotes. O hidroprocessamento é executado através da adição de hidrogénio na presença de catalisadores. Esta tecnologia já se encontra estabelecida em grande escala, sendo responsável pela maioria dos SAF produzidos no planeta.

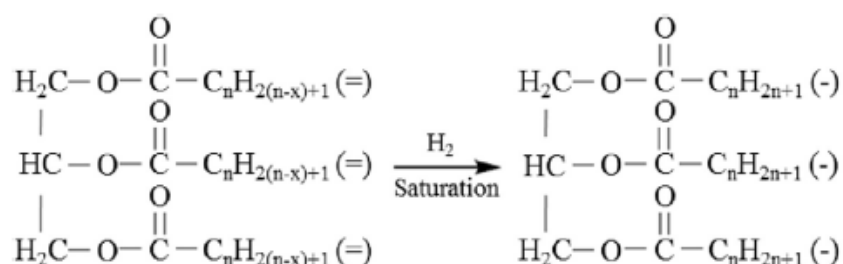


Figura 11 – Hidrogenação (Vásquez, Silva and Castillo, 2017).

O procedimento é iniciado quando triglicerídeos, moléculas de glicerol com 3 cadeias de ácidos gordos, sofrem hidrogenação. Isto é, a adição de hidrogénio às moléculas insaturadas até que todos os ácidos gordos fiquem saturados, exemplificada na figura 11. Segue-se a adição, recorrendo a um catalisador, de mais hidrogénio ao grupo carbonilo e quaisquer das seguintes 3 reações que removem o grupo carboxilo: *deoxygenation* (HDO), *decarbonylation* (DCO) e *decarboxylation* (descarboxilação) (DCO_x) (Vásquez, Silva e Castillo, 2017). Resumidamente, na reação HDO o grupo carboxilo reage com hidrogénio, originando um hidrocarboneto com o mesmo número de átomos de carbono do ácido graxo e duas moléculas de água. Na reação DCO, é produzido um hidrocarboneto com menos um átomo de carbono e uma molécula de monóxido de carbono e água. Finalmente, na reação DCO_x, é também produzido um hidrocarboneto com menos um átomo do que o ácido graxo e uma molécula de dióxido de carbono. As reações requerem quantidades diferentes de hidrogénio que dependem também dos óleos utilizados como matéria-prima. A escolha das reações a utilizar está dependente da seleção de produtos desejados, assim como das suas quantidades, sendo que a via de conversão HEFA-SPK produz simultaneamente diesel, nafta e gases (Zschocke e Scheuermann, 2012).

Tabela 13 – Principais parâmetros do hidroprocessamento de Jatropha e as suas características enquanto matéria-prima (adaptado) (ICAO, 2018) (Vásquez, Silva e Castillo, 2017).

Matéria-prima	Rendimento da colheita de sementes (ton/ha)	Teor de óleo (semente) (%)	Temp. (°C)	Pressão (bar)	Catalisador	Rendimento de HEFA-SPK (SAF) (%)
Jatropha	3.5	27-40	450	60	NiMo/MSP – 1	37.50
			410	50	NiMo/HZSM – 5	54.30
			350	40	Ni ₂ P/Zr – MCM – 41	47.80

Os rendimentos deste processo dependem da matéria-prima, catalisadores, temperatura e pressão. No que toca à matéria-prima, a saturação²⁸ dos ácidos gordos é o parâmetro mais importante, sendo desejada uma maior saturação para diminuir a necessidade de hidrogénio. O tipo de catalisador utilizado é também pertinente, dividindo-se em dois grupos: catalisadores monometálicos²⁹ e sulfetos bimetálicos³⁰ (Vásquez, Silva e Castillo, 2017). A tabela 13 compara alguns destes fatores na produção de HEFA-SPK a partir de Jatropha. Um dos fatores mais penalizadores é o preço da matéria-prima representar cerca do 70% do custo do produto final, sendo que a utilização de OAU é atrativa se for possível a sua obtenção de forma pouco dispendiosa (Vásquez, Silva e Castillo, 2017). A tabela 14 contém informação referente às duas principais tecnologias de hidroprocessamento, exclusivas a combustível para a aviação (embora sejam utilizadas simultaneamente em refinarias de diesel renovável), especificamente as matérias-primas, reduções de emissões no seu ciclo de vida e a capacidade anual.

²⁸ O valor de iodo (IV, do inglês *Iodine Value*) é um índice indicador da insaturação de ácidos gordos, sendo desejado um valor menor a 130.

²⁹ Como níquel (Ni), paládio (Pd), platina (Pt) e ródio (Rh). Activados por enxofre (S).

³⁰ Por exemplo NiMoS₂ e CoMoS₂, auxiliados por óxido de alumínio (Al₂O₃).

Tabela 14 – Principais tecnologias de hidroprocessamento utilizadas comercialmente (Honeywell UOP, 2016) (Neste Oil, 2019).

Empresa	Companhias aéreas	Redução de emissões de GEE (%)	Matéria-prima	Capacidade anual (ton/ano)
Honeywell UOP	United Airlines	65-85	Óleos animais não comestíveis	157457
Neste Oil	KLM e Lufthansa	80	OAU e gordura animal	100000

2.3.1.3 Síntese de Álcoois

O etanol (C_2H_6O) foi durante décadas visto como o mais promissor álcool para misturas em combustíveis. Assim, acabou por ser amplamente utilizado como aditivo para a gasolina, especialmente nos EUA, Brasil e UE, com 54%, 30% e 5% da percentagem anual de produção de etanol, respetivamente (Renewable Fuels Association, 2020). Não obstante, novos desenvolvimentos indicam que o butanol (C_4H_9OH), outro álcool, é uma opção mais apropriada. O principal argumento surge do seu conteúdo energético mais elevado, quando comparado ao etanol, enquanto também manifesta características mais adequadas à combustão (Doliente *et al.*, 2020). Acrescentam-se ainda as semelhanças, enquanto molécula, ao conteúdo da gasolina, o que se deve às estruturas químicas de alguns dos seus isómeros (Wojcieszuk *et al.*, 2021).

No contexto deste trabalho, a síntese de álcoois é relevante pois é a etapa essencial de uma das vias de conversão mais promissoras para SAF. Tanto o etanol como o butanol podem ser utilizados para a produção de SAF via ATJ. No entanto, o etanol traz algumas desvantagens quando a mistura com combustíveis para a aviação é considerada, desde alta volatilidade, maior absorção de água, baixo ponto de inflamação, corrosão e potencial decomposição de elastómeros, às quais se acrescenta ainda a baixa densidade energética (Wang *et al.*, 2016). A produção de etanol como biocombustível é também indiretamente restringida pelos limites impostos nas misturas com gasolina (entre 10 a 15% (Wang *et al.*, 2016)). Contrariamente, a produção de butanol tem margem de penetração, dado que ainda não existe um mercado completamente definido. Entre os isómeros do butanol, a certificação especificou o isobutanol como o isómero adequado para a via ATJ, como citado na secção 2.2.4. Assim, neste trabalho é dedicada especial atenção à produção de etanol e de isobutanol. No entanto, é importante referir que na literatura é comum encontrar também referências para a produção de n-butanol para o mesmo propósito.

Apesar da produção dos vários isómeros do butanol ser possível a partir de combustíveis fósseis, a sua produção também já foi demonstrada via fermentação a partir de material herbáceo lignocelulósico, especificamente para isobutanol (Cai *et al.*, 2018). Outros isómeros também partilham matérias-primas como o milho, cana-de-açúcar e trigo com a produção de etanol (Trindade e Santos, 2017). À semelhança da arcaica utilização do espermacete como um biocombustível primitivo, a utilização de leveduras na fermentação de açúcares provenientes de plantas comestíveis é regularmente reconhecida como a primeira conversão bioquímica alcançada pela humanidade. No entanto, a fermentação de hidratos de carbono a partir de biomassa vegetal não-alimentar ou de

outras fontes de carbono menos convencionais, exige tecnologias mais delicadas, como microrganismos modificados e unidades de processamento adicionais (Geleynse *et al.*, 2018).

Matérias-primas lignocelulósicas, após pré-tratamento adequado, e geralmente mecânico, como por exemplo trituração até se atingirem partículas de 0.2 a 2 milímetros (Alves *et al.*, 2016), podem posteriormente ser sujeitas a um processo bioquímico de síntese de álcool, com especial ênfase na fermentação executada por microrganismos geneticamente modificados para resistir aos álcoois (Roussos *et al.*, 2019).

Após o pré-tratamento mecânico, o processo bioquímico de sintetização de álcool inicia-se com a hidrólise da celulose e hemicelulose contida na matéria-prima, obtendo-se açúcares fermentáveis (Wang *et al.*, 2016). A hidrólise recorre inicialmente a ácidos diluídos para extração de hemicelulose, com um rendimento de 90.8%, deixando intactas a lenhina e a celulose, sendo esta última extraída via hidrólise enzimática e com um rendimento teórico assumido em 90% (Alves *et al.*, 2016). A lenhina sobrando poderá ainda ser utilizada para produzir eletricidade, útil para toda a cadeia de produção ATJ, via incineração (Han, Tao and Wang, 2017).

A fermentação anaeróbica de etanol a partir de açúcares fermentáveis, é definida na equação 8 e a espécie *Saccharomyces cerevisae* pode ser utilizada, sendo que o rendimento desta fermentação, comumente considerada a mais importante industrialmente, atinge valores perto do limite teórico de 0.51 grama de etanol por grama de glucose (Straathof, 2014). Algumas das espécies capazes de efetuar a fermentação de isobutanol são *Escherichia coli* e *Saccharomyces cerevisae* especializadas (Roussos *et al.*, 2019). A mesma investigação acrescenta ainda que a utilização de uma tecnologia integrada de remoção do produto, tal como decapagem a vácuo, pode aumentar o rendimento da produção. O rendimento teórico da fermentação anaeróbica de isobutanol, a partir de glucose, é de 0.41 (g/g), sendo um valor de 0.35 atingido regularmente (Straathof, 2014).



Enquanto que a síntese de etanol está estabelecida industrialmente, na literatura existem várias reivindicações de obstáculos à produção economicamente sustentável de butanol a partir de biomassa, incluindo os seus isómeros mais populares, o n-butanol e o isobutanol, uma vez que ambos são produzidos por fermentação de microrganismos (Trindade e Santos, 2017). Os desafios mais comuns são: o custo da matéria-prima, o rendimento da fermentação e os requisitos energéticos do pré-tratamento da biomassa. Estes desafios estão correlacionados. Por exemplo, caso o desempenho da fermentação não seja satisfatório, é necessária mais matéria-prima, o que, devido ao seu alto custo, expande o custo de produção. Além disso, se é necessária uma maior quantidade de matéria-prima, o consumo de energia aumenta. Assim, amplificar a eficiência da fermentação é a melhor forma de reduzir custos em direção à sustentabilidade económica.

Neste âmbito, é importante discutir a dificuldade existente na taxa de produção da fermentação. Como mencionado acima, a produção de etanol já está estabelecida industrialmente e a via de conversão é geralmente baseada na fermentação. A fermentação do álcool afeta os

microrganismos que executam a fermentação à medida que a concentração do produto aumenta. No entanto, quando o produto é butanol (mais tóxico para os microrganismos do que o etanol) a diminuição no desempenho da fermentação é mais significativa (Ryan, 2019).

No que diz respeito à melhoria do desempenho da fermentação, o estudo realizado por Roussos *et al.*, como mencionado acima, constatou que o uso de uma tecnologia integrada de remoção de produtos aumenta o rendimento da fermentação. Os detalhes do estudo indicam que um título de fermentação de 50 grama por litro levaria a um rendimento de 0.39 grama por grama a um preço de venda de 1.70\$ por litro (assumindo o custo de produção de 1.42\$ por litro), o que poderia ser rentável em alguns países. Isto é mostrado na figura 12, onde as produções sem (SCA) e com (SCB) tecnologia integrada de remoção de produtos são comparadas. Outra conclusão interessante é que em condições integradas de remoção a vácuo (SCB), as matérias-primas passam a ser a despesa mais significativa, com um peso percentual de 39.5%, em vez dos custos dependentes da instalação que normalmente pesariam 32.2%.

Relativamente aos impactos ambientais da fermentação, o processo acima mencionado permite uma redução significativa nas emissões de GEE, exigindo, porém, um maior consumo de água e produzindo outras emissões nocivas elevadas, particularmente de óxidos de azoto e partículas inaláveis (Cai *et al.*, 2018).

Uma via de produção industrial de isobutanol já foi demonstrada pela empresa americana de energia Gevo. O processo começa a partir de qualquer biomassa que contenha açúcares fermentáveis, que, após o pré-tratamento adequado (específico para a matéria-prima selecionada), são submetidos à fermentação por leveduras proprietárias em tanques esterilizados. Neste processo é fundamental remover o isobutanol à medida que é produzido, de forma a não danificar os microrganismos. Para isso, a tecnologia GIFT® (do inglês, *Gevo Integrated Fermentation Technology*) da Gevo é utilizada e assim, o rendimento da fermentação permanece favorável. Outras inovações da empresa incluem a coprodução de alimentos com elevado teor de proteínas, para alimentação de animais, e a partilha da instalação com um processo de produção de etanol, diminuindo os custos de capital (Ryan, 2019).

Em relação aos custos, a já mencionada figura 12 ilustra as despesas anuais da produção de isobutanol por litro. Além disto, é conveniente um exemplo com capacidade da instalação e o respetivo capital necessário. Uma instalação de síntese de isobutanol com uma produção anual de 31.51 ML exigiria um investimento de 80.3 milhões de dólares e um gasto operacional anual de 44.8 milhões (Roussos *et al.*, 2019). A avaliação do MFSP (do inglês, *Minimum Fuel Selling Price*) é particularmente importante e, como mencionado acima, a Análise Tecno-económica (TEA, do inglês, *Techno-economic Assessment*) mais recente obteve um valor de 1.70\$ por litro. No entanto, dois estudos muito semelhantes permitem elaborar uma gama de valores para o MFSP. Ambas as investigações definem o MFSP como o valor mínimo pelo qual o isobutanol produzido deve ser vendido, a fim de atingir um valor atualizado líquido (VAL) igual a zero, com uma taxa interna de retorno (TIR) de 10% e considerando uma vida útil de 30 anos (incluindo decapagem a vácuo). Os

resultados estão na tabela 15. Embora o preço citado inicialmente esteja fora da faixa obtida, os três valores estão próximos. Além disso, o intervalo obtido tem o benefício adicional de similaridade nos modelos usados para obter os limites. Finalmente, no que diz respeito às emissões de GEE, a mesma metodologia pode ser aplicada. Novamente, ambos os estudos são usados para criar um intervalo, conforme mostrado na mesma tabela.

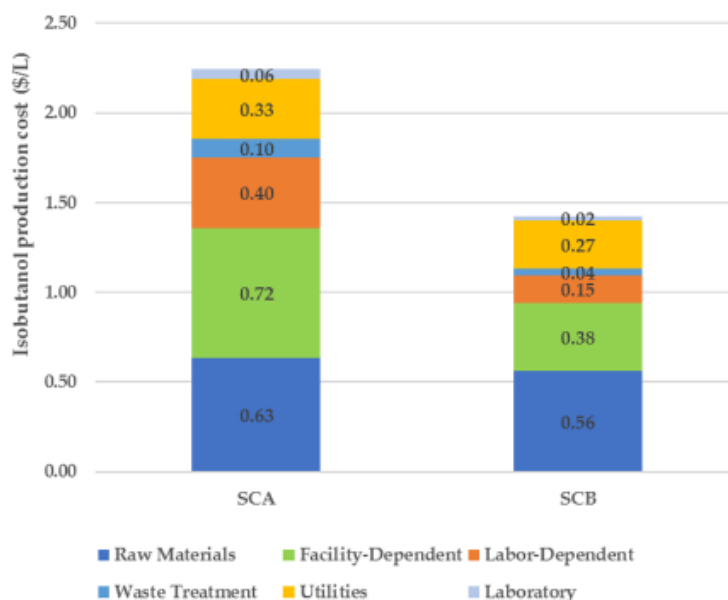


Figura 12 - Frações anuais de custos operacionais na produção de isobutanol, comparando dois processos diferentes, um sem decapagem a vácuo (SCA) e outro com (SCB) (Roussos *et al.*, 2019).

Tabela 15 – Intervalo de valores de MFSP e emissões de GEE na síntese de isobutanol.

Estudo	MFSP (\$/L)	g CO ₂ _e /MJ
(Cai <i>et al.</i> , 2018)	1.20	26
(Tao <i>et al.</i> , 2014)	0.95	40

É importante mencionar ainda que existem sínteses de álcoois alternativas, como por exemplo via conversão termoquímica a partir de biomassa. Um exemplo disso é a gaseificação acompanhada da fermentação de *syngas*, abordada na seção 2.3.1.1., sobre gaseificação, e também ilustrada na figura 7 (b).

2.3.1.4 Desidratação, Oligomerização e Hidrogenação

Para minimizar as diferenças entre álcoois e o produto final, ATJ-SPK, são necessários três passos comuns tanto ao etanol como ao isobutanol, embora com requisitos diferentes para cada uma destas moléculas. Assim, o objetivo destas três etapas é criar uma mistura de parafinas sintéticas, no intervalo de tamanhos de hidratos de carbono associados ao queroseno e fracionadas para consumo como combustível para aviação. A desidratação, oligomerização e hidrogenação são etapas comuns na indústria dos combustíveis fósseis, sendo aplicadas em série como ilustra a figura 13. A

hidrogenação foi abordada na secção 2.3.1.2 pelo que resta caracterizar a desidratação e a oligomerização.

A desidratação, como o nome indica, implica a remoção do grupo hidroxilo (OH) dos álcoois o que resulta na criação de uma molécula de água (H₂O). Historicamente, a desidratação de etanol é utilizada desde os anos 60 como uma alternativa renovável para a produção de etileno (C₂H₄), frequentemente derivado da indústria dos combustíveis fósseis (Geleynse *et al.*, 2018). A equação 9 representa a desidratação catalítica do etanol na presença de um catalisador. A desidratação de isobutanol para isómeros de buteno também já foi demonstrada e inclui catalisadores em comum com o processo do etanol, nomeadamente zeólitos (Geleynse *et al.*, 2018).



De acordo com o estudo realizado por Geleynse *et al.*, a oligomerização de alcenos, por sua vez, é uma reação estabelecida na indústria petroquímica desde os anos 30. No âmbito deste trabalho, os alcenos produzidos durante a desidratação catalítica sofrem oligomerização para que as cadeias de hidratos de carbono atinjam os tamanhos desejados³¹. O processo pode utilizar variados catalisadores (homogéneos ou heterogéneos) e uma ou mais unidades de processamento. No que toca ao etileno, esta conversão alcança um intervalo entre C₄ a C₂₀, sendo preferível uma gama de valores entre C₁₀ a C₁₂. A conversão de isómeros de buteno, como o isobuteno e o n-buteno, apesar de menos desenvolvida, também já é explorada e no que toca a combustíveis para aviação a produção de cadeias com os tamanhos C₁₂ e C₁₆ são desejadas. Alguns dos processos comerciais de conversão de etileno são: processo de uma etapa de Chevron-Phillips Ziegler, processo de Ziegler de duas etapas e processo Shell Higher Olefins. Os diferentes parâmetros das reações necessárias durante a via de conversão ATJ são expostos na tabela 16.

Tabela 16 – Condições das unidades de processamento na via ATJ (adaptado) (Geleynse *et al.*, 2018).

Parâmetro	Desidratação		Oligomerização		Hidrogenação
	Etanol	Isobutanol	Etanol	Isobutanol	
Temperatura (C°)	340	325	250	100	100
Pressão (psi)	55	60	300	250	250
Conversão de passagem única/Distribuição	90%	90%	40% C ₁₀ , 20% C ₁₈ + C ₁₂ , 10% C ₆ , C ₁₆	20% C ₈ , 70% C ₁₂ , 10% C ₁₆	100%
Reciclagem	Integrada com separação de álcoois		Criada para produzir olefinas maiores C ₁₂₊		3:1 fluxo molar de H ₂ com reciclagem do mesmo

Para facilitar a elaboração de modelos mais complexos, abordados na secção 3.3, destas vias de conversão, foi criada uma base de dados simples com os rendimentos mássicos encontrados na literatura, mantendo sempre que possível consistente, na pesquisa, a matéria-prima, neste caso os sobrantes de milho. Dada a escassez de dados concretos para cada etapa, devido à natureza proprietária destas novas tecnologias, a base de dados passo-a-passo é exclusiva à via ATJ e às suas etapas, sendo ainda assim, infelizmente, muito limitada.

³¹ C₈ a C₁₆, para o queroseno.

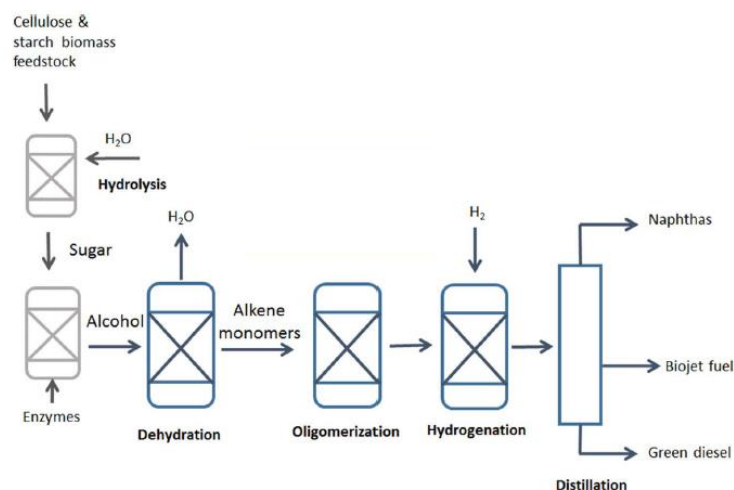


Figura 13 – Esquemática da via ATJ a partir de biomassa (Gutiérrez-Antonio *et al.*, 2017).

A tabela 17 agrupa os rendimentos mássicos da via ATJ específica ao etanol, enquanto que a tabela 18 reúne os mesmos rendimentos especificamente na via do isobutanol. Através da observação das duas tabelas, torna-se claro que a etapa da fermentação é a etapa limitante da cadeia de produção ATJ, independentemente do álcool escolhido. Comparando ambas as tabelas, a fermentação de etanol, que atinge valores perto dos teóricos, é mais favorável, devendo-se não só ao conhecimento já adquirido pela indústria como também à menor toxicidade do etanol para com os microrganismos.

Tabela 17 - Rendimentos mássicos na literatura para as etapas da via de produção ATJ, etanol.

Etapas		Rendimentos mássicos						
Hidrólise				0.5900			0.2955	
Fermentação		0.5000	0.4752	0.3300	0.4600			
Desidratação		0.6000			0.9000	0.9950		
Oligomerização					0.9763	0.9930		
Hidrogenação			0.4800		1.0000	0.9900		
Destilação								
Destilação	% SAF	0.4800			0.7000		0.7500	
	% Diesel	0.1700			0.2000		0.0900	
	% Gasolina	0.3500			0.1000		0.1600	
(g _{SAF} /g _{açúcar fermentável})			0.2070	0.1848	0.2760		0.1100 ³²	
Fontes		(Neuling and Kaltschmitt, 2015)	(Straathof, 2014)	(Alves <i>et al.</i> , 2016)	(Jong <i>et al.</i> , 2015)	(Geleynse <i>et al.</i> , 2018)	(Klein <i>et al.</i> , 2018)	(Han, Tao and Wang, 2017)

No entanto, a via específica ao isobutanol parece oferecer uma maior seletividade na destilação de SAF, o que equilibra as duas cadeias de produção, pelo menos em termos de massa. Isto faz sentido porque o isobutanol, enquanto molécula, tem 2 átomos de carbono a mais que o etanol, o que aumenta o seu rendimento teórico no processo ATJ. Contrariamente, a baixa seletividade do etanol durante a oligomerização faz com que o produto final da produção tenha uma

³² No estudo em questão, o rendimento mássico total é definido como grama de SAF por grama de sobranes de milho.

maior diversidade de tamanhos para as cadeias de hidratos de carbono, resultando num produto mais parecido com o combustível a jato tradicional (Geleynse *et al.*, 2018). Na literatura não foram encontrados rendimentos específicos à destilação, apenas da sua seletividade, sendo que no que diz respeito ao isobutanol, apenas um conjunto de dados foi encontrado. No que toca à hidrólise, apenas 1 valor foi encontrado, específico ao etanol.

Tabela 18 - Rendimentos mássicos na literatura para as etapas da via de produção ATJ, isobutanol.

Etapas		Rendimentos mássicos					
Hidrólise							
Fermentação		0.3500		0.3700	0.2880	0.3900	
Desidratação				0.9000	0.9930		
Oligomerização			0.9600	0.9903	0.8500		
Hidrogenação				1.0000	0.9900		
Destilação							
Destilação	% SAF			0.7000			
	% Diesel			0.000			
	% Gasolina			0.3000			
(gSAF/gaçúcar fermentável)				0.2775			
Fontes		(Neuling and Kaltschmitt, 2015)	(Straathof, 2014)	(Doliente <i>et al.</i> , 2020)	(Geleynse <i>et al.</i> , 2018)	(Klein <i>et al.</i> , 2018)	(Roussos <i>et al.</i> , 2019)

Tabela 19 - Recursos e rendimentos da via ATJ (etanol) utilizando sobranço de milho como matéria-prima.

Recurso	Requerimento	Rendimento	Unidades	Fonte
Hidrogénio	0.528		TJ/TJ SAF	(Han, Tao and Wang, 2017)
Água	6.100		L/L SAF	
Eletricidade Sobranço		226	kWh/ton matéria-prima	

A tabela 19 reúne dados referentes aos recursos e rendimentos da via ATJ, que consome quantidades elevadas de água e hidrogénio. Em contrapartida, caso se opte pela inceneração da lenhina contida nos sobranço de milho e inútil para a produção da SAF, gasolina ou diesel, é possível produzir eletricidade para todo o processo, sendo comum encontrar na literatura referência a eletricidade coproduzida.

2.3.2 Conclusões do Estado da Arte

Terminado o estudo do estado da arte, vários resultados foram alcançados. Das quatro famílias de conversão certificadas pela ASTM à data de início deste trabalho, apenas 3 são de execução viável a curto-médio prazo: HEFA, FT e ATJ, com os FRL de 9,8 e 8, respetivamente. Destas três famílias, apenas a HEFA e a FT aparentam aquiescer os requisitos da RED II para a redução de emissões de GEE. No entanto, a via ATJ encontra-se muito perto de atingir o mínimo de redução de emissões de 65%, com alguns exemplos disso presentes na literatura (Han, Tao and Wang, 2017). Sendo assim, uma análise aprofundada sobre cada uma destas vias foi realizada.

Em termos de prontidão de tecnologia, a conversão através de lípidos, HEFA, está bem estabelecida, enquanto que as outras duas vias, uma de conversão bioquímica, ATJ, e outra termoquímica, FT, deverão atingir o nível 9 da FRL, representado como uma central comercial operacional, em 2021. Estas três vias de conversão são constituídas por tecnologias já estabelecidas em várias outras indústrias, pelo que a derradeira prova das vias FT e ATJ será a combinação destas tecnologias, a grande escala, de forma eficiente e viável economicamente, a partir de biomassa, superando assim as dificuldades inerentes a esta matéria-prima, tais como o teor de humidade, cinzas e heterogeneidade. É também importante ressaltar que as vias ATJ e FT já lideravam, em 2019, as capacidades instaladas em fase de planos, combinadas valendo um total de 550 mil toneladas anuais de produção (Sustainable Aviation, 2020).

O esquema da figura 14 exhibe uma simplificação das três vias simultaneamente, o que é útil pois permite observar as sinergias que existem. As três vias utilizam diferentes tipos de biomassa como matéria-prima, a hipótese comum de hidrogenação e destilação fracionada como etapas finais e ainda a possibilidade de fermentação de *syngas*. Assim, é nítido que as três vias se complementam, sendo que existem até alguns exemplos de estudos sobre hipotéticas biorrefinarias integradas (Klein *et al.*, 2018).

Em termos de matérias-primas, o hidrogénio é um requisito de quaisquer destas opções, dado que todas incluem hidrogenação. A tabela 20 contém também os rendimentos mássicos de cada uma destas vias a partir de matérias-primas semelhantes às previamente mencionadas na tabela 5.

Tabela 20 – Rendimentos das vias de conversão (adaptado) (Alves *et al.*, 2016).

Via de Conversão	Rendimento Mássico (g SAF/ g Matéria-prima)	Matéria-prima
HEFA	0.494	Óleos
ATJ	0.207	Açúcares Fermentáveis
FT	0.151	Material lignocelulósico

Finalmente, relativamente à economia destas vias, o fator mais importante, de acordo com a literatura, é muitas vezes o custo da matéria-prima. Isto deve-se a ocupar uma percentagem muito elevada do custo de produção, comumente superior ao CAPEX. Pelo que obter matéria-prima a baixo custo poderá viabilizar estratégias eventualmente implementadas.

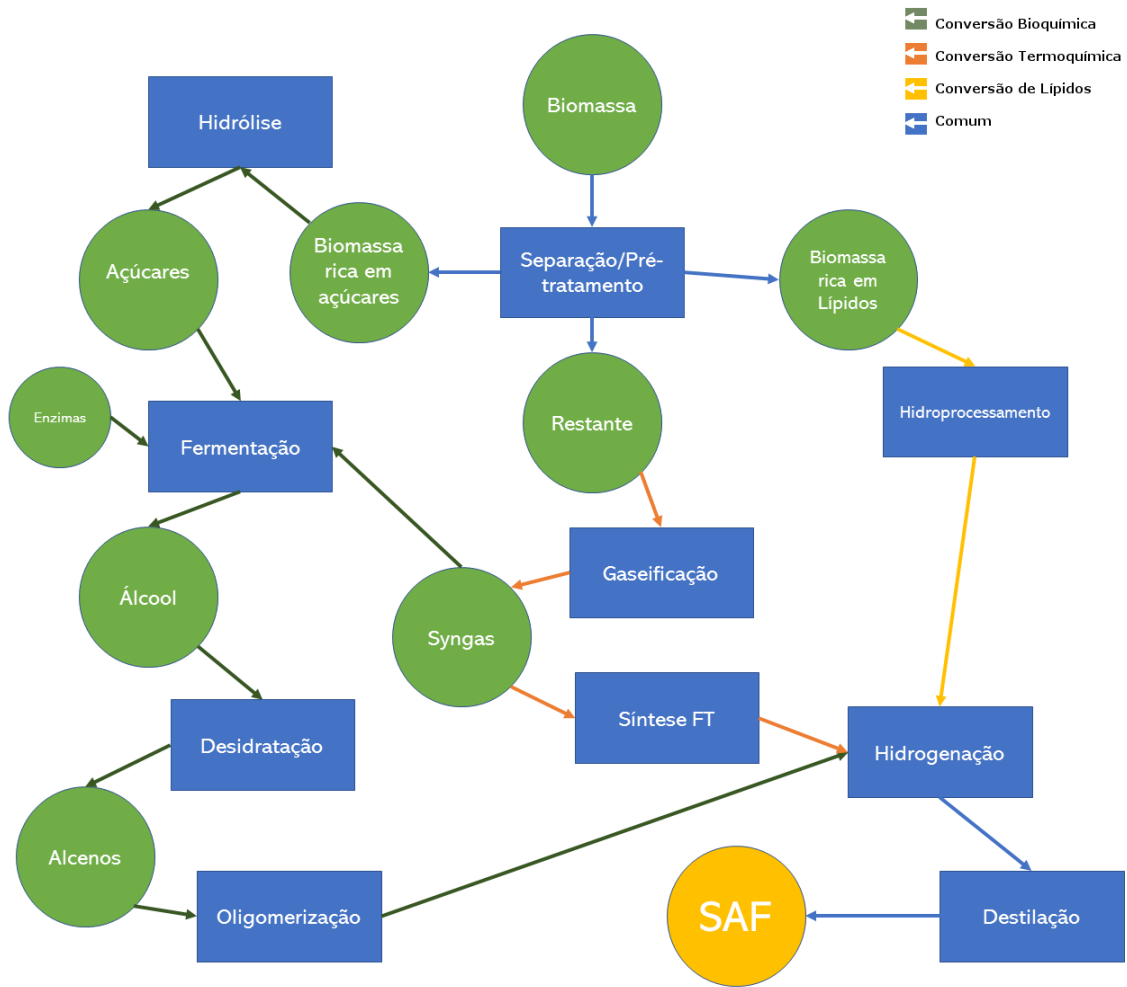


Figura 14 – Esquema simplificado das vias de conversão HEFA, FT e ATJ.

3 Modelação das Potenciais Cadeias de Produção de SAF em Portugal

3.1 Produção e Consumo de Combustível Tradicional para a Aviação

É fundamental averiguar os requisitos do sistema a ser esboçado. Através de um conjunto de dados da Iniciativa Conjunta de Dados das Organizações³³ (JODI, do inglês *Joint Organisations Data Initiative*) obtido no website *Knoema* (Joint Organisations Data Initiative, 2021), criou-se o gráfico da figura 15, que compara a produção e o consumo de combustível tradicional para a aviação em Portugal, ao longo da última década. Este conjunto de dados mostrou-se conforme quando comparado com os balanços energéticos da Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG) (DGEG, 2021).

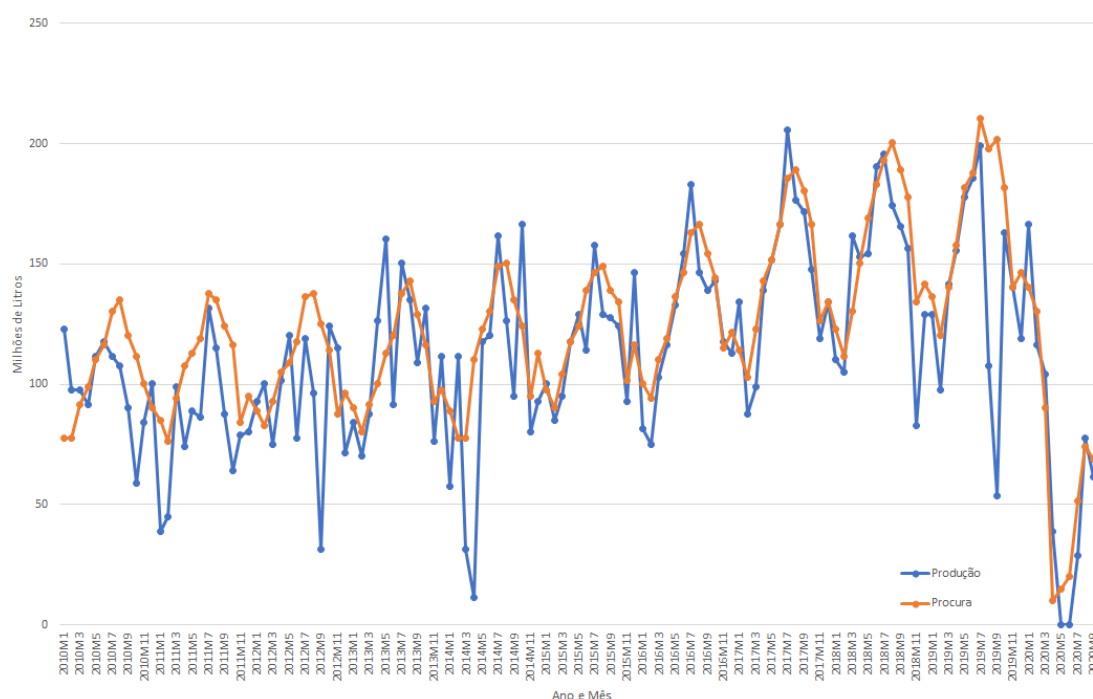


Figura 15 – Produção e Consumo de Combustível para a Aviação em Portugal, entre Janeiro de 2010 e Outubro de 2020.

Através da análise deste gráfico, torna-se claro que a produção e o consumo estão correlacionados ($R^2 = 0.5958$), algo que se verificou também durante a pandemia em que vivemos. Assim, excluindo ocasiões pontuais, pode assumir-se que a produção de combustível para a aviação

³³ Uma colaboração internacional para melhorar a acessibilidade e transparência de dados sobre a indústria do petróleo e gás natural.

em Portugal satisfaz a procura. Finalmente, tendo em conta que os picos mensais de produção atingem aproximadamente os 200 milhões de litros por mês e que as certificações maximizam a mistura de SAF até 50%, em volume, o máximo de capacidade instalada está assim limitado a 100 milhões de litros por mês.

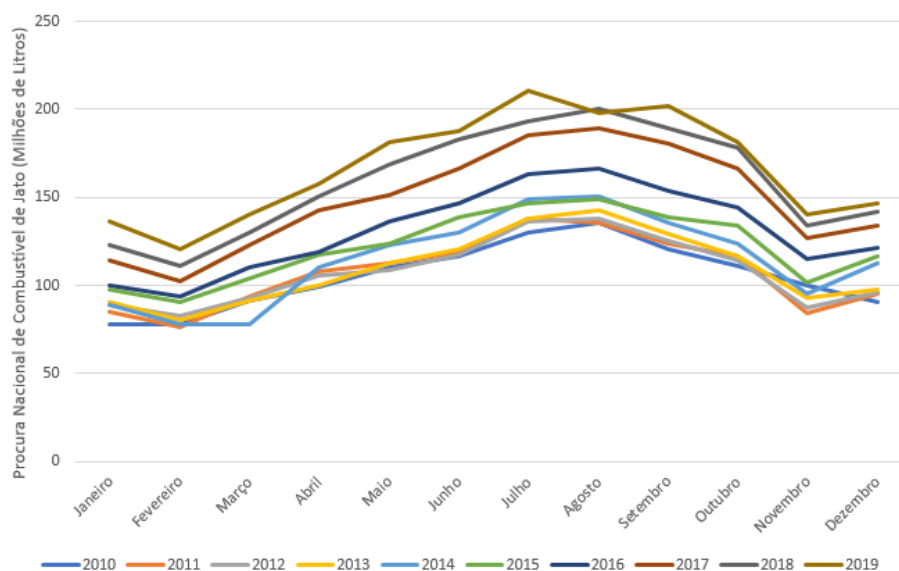


Figura 16 – Sazonalidade da Procura Nacional de Combustível para Jato ao longo da última década.

Outra conclusão importante a retirar do conjunto de dados da figura 15 é que a procura de combustível de jato em Portugal é sazonal, algo mais facilmente observável na figura 16 onde o pico da procura nos meses de verão é nítido. Ainda no que toca a figura 15, a procura (excluindo o período referente à pandemia em que vivemos) é mais estável do que a produção, algo que poderá ocorrer devido à natureza da indústria dos combustíveis fósseis. Assim, assume-se que embora limitada, em função da produção da indústria de combustível a jato, ao máximo dos 100 milhões de litros por mês de capacidade instalada, a produção de SAF deverá seguir as tendências da **procura** e não da produção de jato de origem fóssil. Neste contexto, fez-se a média mensal (mês a mês) da última década, com os resultados exibidos na tabela 21. A média da procura mensal fica assim nos 127 milhões, o mínimo (Fevereiro) no 91 milhões e o máximo (Agosto) nos 160 milhões de litros. Paralelamente, a média das emissões mensais de GEE é de 391 mil toneladas, enquanto que o mínimo e o máximo são 281 e 494 mil toneladas de CO_{2e} , respetivamente. Nos cálculos desta tabela para as emissões de GEE, foram utilizados os valores de 89 g CO_{2e}/MJ (definido pela ICAO), 807.5 kg/ m^3 e 42.8 MJ/kg, para as emissões de GEE, densidade e PCI, respetivamente. Os dois últimos obtidos da tabela 1, com a densidade utilizada a ser o valor intermédio entre o máximo e o mínimo descritos.

Tabela 21 – Médias Mensais Nacionais da Procura e das Emissões de GEE referentes à indústria do combustível para jato, ao longo da última década.

Média/Mês	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Procura (Milhões de litros)	100	91	105	121	133	143	159	160	150	139	108	115
Emissões GEE (kton CO ₂ e)	308	281	324	372	409	439	489	494	461	427	331	355

3.2 Modelo Analítico de Produção

Foi criado um modelo analítico de produção, com o objetivo de avaliar o potencial nacional para a produção de SAF, as emissões de GEE associadas a essa produção e a alocação energética da produção a cada uma das vias referidas anteriormente (HEFA, ATJ e FT) e exclusivamente tendo em conta as matérias-primas da tabela 20. Para tal, a figura 14 serve de guia visual.

Os parâmetros do modelo estão expostos na tabela 22. Todos os valores utilizados foram mencionados anteriormente neste trabalho, incluindo os máximos de produção mensal (pico de 200 milhões de litros), cujas respetivas emissões são aproximadamente 615 mil toneladas de CO₂e, calculadas com o mesmo método dos valores da tabela 21. Os valores utilizados para os rendimentos, têm origem em fontes diferentes dos valores utilizados para as emissões, no entanto as matérias-primas são as mesmas, mantendo-se a consistência. Para a via HEFA assume-se assim **óleos alimentares usados** como matéria-prima, enquanto que as vias ATJ e FT utilizam **sobrantes de milho** (por exemplo a palha) e **resíduos lignocelulósicos** especificamente de **eucalipto**, respetivamente. Ademais, as emissões referem-se precisamente aos SAF produzidos por cada via, não incluindo assim outros produtos químicos de cada uma das vias. Finalmente, foi assumido que os SAF, na qualidade de combustível *drop-in*, têm propriedades idênticas às do combustível para a aviação tradicional.

O conjunto de equações 10 a 14 descreve o início do modelo. As equações 10, 11 e 12 transformam os *inputs* do utilizador, quer sejam MJ por mês, ktep por ano ou milhões de litros por mês³⁴, de produção de SAF, em MJ por mês. Depois de estar definido o *output* mensal energético de SAF, as equações 13 e 14 fazem a transformação para massa e volume, respetivamente. Já o conjunto de equações 15 a 18 descreve o cálculo das emissões *X*. A equação 15 obtém as emissões para cada uma das vias, em função da percentagem de produção de energia de cada uma delas, enquanto que a 16 e a 17 resultam nas emissões totais da produção dos SAF e da produção de combustível standard. Por fim, a equação 18 obtém o total da produção de combustíveis para aviação. Nestas equações F_i e $\%_i$ representam as emissões de GEE e as percentagens energéticas

³⁴ V_{SAF} refere-se ao volume de *output* especificado pelo utilizador na forma de *input*, enquanto que V_{SAF} é o volume de *output* de SAF total, deduzido a partir de todos os *inputs*.

de uma dada via de conversão i . Relevante também é o cálculo da redução das emissões de GEE, uma simples subtração de X_{total} aplicada ao número máximo das emissões na tabela 22.

Tabela 22 – Parâmetros do modelo analítico de produção das vias de produção.

Parâmetro	Referente a:	Valor	Unidade
Produção Mensal Máxima	Jet A-1	200	Milhões de litros/mês
Máximo de Emissões de GEE		615.1858	kton CO _{2e} /mês
PCI _{Standard Jet}		42.8	MJ/kg
Densidade a 15 °C ($\rho_{Standard Jet}$)		807.5	kg/m ³
Rendimentos Mássicos (β_i)	HEFA	0.494	g _{SAF} /g _{óleo}
	ATJ	0.207	g _{SAF} /g _{açúcar fermentável}
	FT	0.151	g _{SAF} /g _{material lignocelulósico}
Emissões de GEE (F_i)	HEFA	14	g CO _{2e} / MJ
	ATJ	35	
	FT	13.7	
	Combustível para jato tradicional	89	

$$E_{SAF} (MJ/mês) = EMensal (MJ/mês) \quad (10)$$

$$E_{SAF} (MJ/mês) = EAnual_{(ktep/ano)} \cdot \frac{418686000}{12} \quad (11)$$

$$E_{SAF} (MJ/mês) = V_{SAF} (\text{Milhões de litros/mês}) \cdot \rho_{Standard Jet} (\text{kg/m}^3) \cdot PCI_{Standard Jet} (\text{MJ/kg}) \cdot 1000 \quad (12)$$

$$M_{SAF} (kton/mês) = \frac{E_{SAF} (MJ/mês)}{PCI_{Standard Jet} (MJ/kg)} \cdot 1 \cdot 10^{-6} \quad (13)$$

$$V_{SAF} (\text{Milhões de litros/mês}) = \frac{M_{SAF} (kton/mês)}{\rho_{Standard Jet} (\text{kg/m}^3) \cdot 1000} \quad (14)$$

$$X_i (kton \text{ CO}_{2e}/mês) = F_i (\text{g CO}_{2e}/\text{MJ}) \cdot \frac{\%_i}{100} \cdot E_{SAF} (MJ/mês) \cdot 1 \cdot 10^{-9} \quad (15)$$

$$X_{SAF} (kton \text{ CO}_{2e}/mês) = \sum_1^3 X_i (kton \text{ CO}_{2e}/mês) \quad (16)$$

$$X_{Standard\ Jet} (kton\ CO_2e/mês) = (200 - V_{SAF} (Milhões\ de\ litros/mês)) \cdot 1000 \cdot \rho_{Standard\ Jet} (kg/m^3) \cdot PCI_{Standard\ Jet} (MJ/kg) \cdot 1 \cdot 10^{-9} \cdot F_{Standard\ Jet} (g\ CO_2e/MJ) \quad (17)$$

$$X_{total} (kton\ CO_2e/mês) = X_{SAF} (kton\ CO_2e/mês) + X_{Standard\ Jet} (kton\ CO_2e/mês) \quad (18)$$

A equação 19 diz respeito ao cálculo dos *inputs* matéria-prima, I , em milhares de toneladas por mês. Nesta equação β_i representa o rendimento mássico de cada uma das vias. Destaca-se a particularidade da via ATJ, cujo rendimento se baseia em açúcares fermentáveis e não na matéria-prima original, sobrantes de milho. Em prática este valor é de 0.121 grama de SAF por grama de sobrantes de milho, a razão está explícita na página 47.

$$I_i (kton/mês) = \frac{E_{SAF} (MJ/mês) \cdot \frac{\%_i}{100}}{PCI_{Standard\ Jet} (MJ/kg)} \cdot 1 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{1}{\beta_i} \quad (19)$$

Resumindo, os *inputs* do modelo são a produção mensal de SAF desejada, seja em MJ, ktep ou milhões de litros e a alocação desta produção (em função da energia), em percentagem, a cada uma das três vias. O modelo utiliza os parâmetros da tabela 22 e devolve principalmente, para cada via de conversão e os totais (tanto de SAF produzido como de combustível tradicional para jato) a energia (MJ/mês), a massa (kton/mês), o volume (milhões de litros/mês), as emissões de GEE (kton CO_2e /mês), a quantidade de matéria-prima necessária (kton/mês) e, por fim, a redução de GEE, comparada com o pico mensal de produção, em percentagem.

3.2.1 Discussão de Cenários Estudados Através do Modelo Analítico de Produção

3.2.1.1 Cenário 1 – Produção Máxima de SAF

Completado o modelo, procedeu-se à definição de cenários. Na primeira abordagem optou-se por quantificar o máximo da capacidade instalada e respetivas emissões. Dado que a produção de SAF está teoricamente limitada aos 100 milhões de litros mensais, esse é necessariamente o máximo atual. Assim, o **Cenário 1** utiliza o *input* de uma produção que atinge os 100 milhões de litros por mês, produção essa completamente (100%, no *input* do modelo) atribuída à via de conversão FT, dado que minimiza as emissões de GEE. Os outputs do Cenário 1 estão na tabela 23, onde a linha “**Total**” inclui as quantidades de energia, massa, volume e emissões da produção total de SAF com o combustível tradicional, no Cenário 1.

Tabela 23 – Resultados do modelo analítico de produção: Cenário 1.

Cenário 1	Energia (TJ/mês)	Massa (kton/mês)	Volume (milhões de litros/mês)	Emissões de GEE (kton CO _{2e} /mês)	Massa de Matéria-Prima (kton/mês)	Redução de GEE (%)
FT	3456.10	80.75	100	47.35	534.77	
Total	6912.20	161.50	200	354.94		42.33

Torna-se claro, através dos resultados, que a redução máxima de emissões de GEE que Portugal poderá atingir na indústria da aviação será de 42.33%. Para tal seriam necessárias, mensalmente, mais de 500 mil toneladas de resíduos lignocelulósicos, nomeadamente de eucalipto. Acrescenta-se ainda que durante a realização deste trabalho ainda não foram demonstradas biorrefinarias que utilizem a via de conversão FT para uma escala de 100 milhões de litros por mês, sendo que entre os projetos mencionados anteriormente, o mais ambicioso procura atingir um *input* de 500 mil toneladas de matéria-prima (RSU, nesse caso) por ano.

3.2.1.2 Cenário 2 – Produção Mínima e Tecnologicamente Madura de SAF

Na definição do **Cenário 2** foi escolhido como meta para a produção de SAF o valor energético de 155 ktep anuais, definido no PNEC como desejado para os biocombustíveis avançados em 2030. Em relação à alocação desta produção, optou-se pela alocação a 100% para a via HEFA, dado que já se encontra industrialmente estabelecida (FRL de 9) e que o seu produto é elegível tanto para a RED II como também como um CEF, verificando-se assim de maturidade tecnológica garantida.

Os resultados do cenário 2 estão na tabela 24. Este cenário implica uma produção de SAF que representaria 7.82% da produção nacional de combustível para aviação, em volume, o que atingiria uma redução de 6.59% das emissões de GEE em relação ao pico mensal de produção. Acrescenta-se ainda que a produção mensal estaria na mesma ordem de grandeza das centrais de produção desta via que já estão operacionais. Para completar, o cenário 2 requeria 25.58 milhares de toneladas de óleos alimentares usados, todos os meses.

Tabela 24 – Resultados do modelo analítico de produção: Cenário 2.

Cenário 2	Energia (TJ/mês)	Massa (kton/mês)	Volume (milhões de litros/mês)	Emissões de GEE (kton CO _{2e} /mês)	Massa de Matéria-Prima (kton/mês)	Redução de GEE (%)
HEFA	540.80	12.64	15.65	7.57	25.58	
Total	6912.20	161.50	200	574.63		6.59

3.2.1.3 Cenário 3 – Maximização das Matérias-primas Disponíveis para a Produção de SAF

Dada a natureza teórica dos cenários anteriores, nenhum dos dois teve em conta as circunstâncias nacionais em termos de matérias-primas. Pelo que se recorreu ao Plano Nacional para a Promoção das Biorrefinarias (Pinto *et al.*, 2017) e também ao relatório de Gestão de OAU (APA, 2019) para elaborar a tabela 25, onde está explícita a biomassa disponível para estas vias de produção. É importante referir que no caso dos OAU, os valores escolhidos são os atualmente utilizados na produção de biodiesel. Dividindo por 12 os totais anuais da tabela 25, alcançam-se as médias mensais de 118.08, 37.33 e 13.08 mil toneladas de sobrantes de milho, resíduos de eucalipto e OAU. Assim, por comparação com as penúltimas colunas das tabelas 23 e 24, os dois cenários iniciais ficam excluídos, o que seria de esperar dado que se trataram de cenários que limitam teoricamente as capacidades instaladas e respetivas emissões.

Tabela 25 – Biomassa disponível para biorrefinarias em Portugal continental.

Região NUTS II	Sobrantes de Milho (kton/ano)	Resíduos de Eucalipto (kton/ano)	OAU (2018) (kton/ano)
Norte	174	82.40	
Centro	408	216.73	
AML	63	9.11	
Alentejo	769	124.43	
Algarve	3	15.25	
Total	1417	447.92	157
Fonte:	(Pinto <i>et al.</i> , 2017)		(APA, 2019)

Com o objetivo de caracterizar, através desta metodologia de aproximação inicial, o potencial nacional para a produção de SAF, o modelo foi utilizado em sentido contrário. Isto é, foram introduzidos como *inputs* os valores mensais obtidos a partir da tabela 25 e devolvidos como *outputs* a produção mensal e as percentagens dedicadas a cada uma das vias de conversão. Uma vez que neste cenário já se recorre à via ATJ, através dos sobrantes de milho, foi necessário averiguar a percentagem, em massa, de açúcares fermentáveis³⁵ presentes nessa matéria-prima. A composição está exposta na tabela 26 e neste modelo assumiu-se uma capacidade de extração de 90% desses açúcares fermentáveis.

Os resultados deste **Cenário 3** são apresentados na tabela 27. O potencial nacional para a produção de SAF fica assim pelos 32.69 milhões de litros mensais, tendo em conta as matérias-primas estudadas. Este número equivale a 16.35% do volume do pico mensal de 200 milhões de litros, pelo que se trata de uma quantia significativa que representaria uma redução nas emissões de GEE na ordem dos 11.70%. As percentagens desta produção, em energia, alocadas a cada via de conversão seriam 24.48% para a via HEFA, 54.17% para a via ATJ e 21.35% para a via FT, equivalendo a 8, 17.71 e 6.98 milhões de litros mensais, respetivamente.

³⁵ O rendimento da via ATJ na Tabela 22 considera açúcares fermentáveis como matéria-prima.

Tabela 26 – Composição das Matérias-primas selecionadas.

Matéria-prima	Sobrantes de Milho	Resíduos de Eucalipto
C (%)	44.250	48.210
H (%)	5.740	6.360
O (%)	42.420	45.350
N (%)	0.460	0.080
S (%)	0.008	
Cinzas (%)	8.860	0.770
Teor de Humidade (%)	15.00	7.520
Açúcares Fermentáveis (% em massa)	65.00	
PCI (MJ/kg)	17.450	18.820
Fonte	(Huang <i>et al.</i> , 2009)	(Nwokolo, Mukumba and Obileke, 2020)

O principal aspeto negativo deste cenário 3 é que a matéria-prima da tecnologia de conversão HEFA está já destinada à produção de biodiesel para transporte rodoviário, o que, como mencionado anteriormente, é um dos principais obstáculos à implementação da produção de SAF. Contrariamente, a utilização das sobrantes de milho e de resíduos de eucalipto para a produção de combustíveis para transportes, especificamente para a aviação, sendo a indústria de transportes mais difícil de eletrificar, irá de encontro aos princípios de utilização em cascata, representados na figura 5. Outro fator positivo é estas matérias-primas serem resíduos de outras indústrias, promovendo assim a economia circular e evitando penalizações de alterações de uso de terras, derivadas das diretivas europeias.

Tabela 27 – Resultados do modelo analítico de produção: Cenário 3.

Cenário 3	Matéria-prima	Energia (TJ/mês)	Massa (kton/mês)	Volume (milhões de litros/mês)	Emissões de GEE (kton CO _{2e} /mês)	Massa de Matéria-Prima (kton/mês)	Redução de GEE (%)
HEFA	OAU	276.57	6.46	8.00	3.87	13.08	
ATJ	Sobrantes de Milho	612.01	14.30	17.71	21.42	118.08	
FT	Resíduos de Eucalipto	241.21	5.64	6.98	3.30	37.32	
Produção total de SAF		1129.80	26.40	32.69	28.60	168.49	
Total		6912.20	161.50	200	543.23		11.70

3.2.1.4 Cenários 4 e 5 – Otimização das vias ATJ e FT

Numa perspetiva de implementação, é relevante também ter em conta o custo de aquisição da biomassa, especialmente porque essa é comumente a maior despesa das biorrefinarias, pelo que é um fator essencial para viabilidade económica das mesmas. Apesar de se tratarem de resíduos de outras indústrias, as sobrantes de milho e os resíduos de eucalipto implicam custos derivados das perdas de nutrientes e da erosão de solos onde se dão as culturas, entre outras. Na literatura desta

área, o custo associado aos resíduos lignocelulósicos do eucalipto é de 51.03 euros por tonelada (Alves *et al.*, 2016) e, apesar de não existir um mercado para os sobrantes de milho, o custo associado a essa matéria-prima é de 40.68 euros por tonelada (Edwards, Hart and Leibold, 2012)³⁶.

Com a informação reunida e o modelo analítico de produção construído, é possível otimizar recursos através da programação linear. A solução deste problema de programação linear será simplificada pois as quantidades mensais de matérias-primas serão as variáveis e, sendo estas apenas duas, a solução poderá ser obtida graficamente. No contexto deste trabalho, a redução das emissões de GEE é o objetivo principal de modo a que seja possível tornar a indústria da aviação mais sustentável, com base nas circunstâncias nacionais. Por contrapartida, minimizar os custos das matérias-primas é desejável para a viabilidade económica das biorrefinarias. Assim existirão duas funções objetivo. A função custo (20) é obtida imediatamente dados os custos de cada matéria-prima.

$$C \text{ (kEUR/mês)} = 40.68 \cdot I_{ATJ} \text{ (kton/mês)} + 51.30 \cdot I_{FT} \text{ (kton/mês)} \quad (20)$$

No entanto, a função da redução das emissões de GEE é um pouco mais complexa. O conjunto de equações 21 a 23 descreve a transição desde a equação que rege a massa de combustível tradicional para jato, $M_{Standard \text{ Jet}}$, produzido todos os meses, em função das matérias-primas das vias ATJ e FT, até a equação que rege as emissões provocadas por essa massa de combustível tradicional, $X_{Standard \text{ Jet}}$. Da equação 21 para a 22 é feita uma multiplicação pelo PCI do combustível a jato (42.8 TJ/kton) e da 22 para a 23 é feita uma multiplicação pelas suas emissões padrão (0.089 kton/TJ), valores tabelados anteriormente. Analogamente, na equação 21 são utilizados os rendimentos mássicos das respetivas vias e a massa total de combustível para a aviação (161.5 milhares de toneladas) que é produzido nos picos mensais, ambos declarados na tabela 22.

$$M_{Standard \text{ Jet}} \text{ (kton/mês)} = 161.5 - \beta_{ATJ} \cdot I_{ATJ} - \beta_{FT} \cdot I_{FT} = 161.5 - 0.121 \cdot I_{ATJ} - 0.151 \cdot I_{FT} \quad (21)$$

$$E_{Standard \text{ Jet}} \text{ (TJ/mês)} = 6912.2 - 5.179 \cdot I_{ATJ} - 6.463 \cdot I_{FT} \quad (22)$$

$$X_{Standard \text{ Jet}} \text{ (kton CO}_2\text{e/mês)} = 615.186 - 0.461 \cdot I_{ATJ} - 0.575 \cdot I_{FT} \quad (23)$$

Alcançada a equação das emissões derivadas do combustível para jato de origem fóssil, é necessário somar as emissões derivadas das vias de produção de SAF, pelo que é preciso definir essas equações também. A equação 24 define as emissões causadas pela via de produção ATJ a partir da quantidade de matéria-prima introduzida. É feita uma multiplicação pelo rendimento, em função dos sobrantes de milho e não dos açúcares fermentáveis e também é multiplicado o PCI, 42.8,

³⁶ Estes valores foram calculados tendo em conta a inflação do dólar americano, conversão para toneladas SI e conversão para euros (1 dólar = 0.82 euros).

em TJ/kton e o respetivo valor padrão de emissões 0.035 (kton/TJ). O mesmo processo é aplicado à via FT na equação 26. Os resultados são as equações 25 e 27, respetivamente.

$$X_{ATJ} \text{ (kton CO}_2\text{/mês)} = \beta_{ATJ} \cdot I_{ATJ} \cdot PCI_{Standard\ Jet} \cdot \frac{F_{ATJ}}{1000} = 0.121 \cdot I_{ATJ} \cdot 42.8 \cdot 0.035 \quad (24)$$

$$X_{ATJ} \text{ (kton CO}_2\text{/mês)} = 0.181 \cdot I_{ATJ} \quad (25)$$

$$X_{FT} \text{ (kton CO}_2\text{/mês)} = \beta_{FT} \cdot I_{FT} \cdot PCI_{Standard\ Jet} \cdot \frac{F_{FT}}{1000} = 0.151 \cdot I_{FT} \cdot 42.8 \cdot 0.0137 \quad (26)$$

$$X_{FT} \text{ (kton CO}_2\text{/mês)} = 0.089 \cdot I_{FT} \quad (27)$$

Através da soma das equações 25 e 27 à equação 23 obtém-se a equação 28. Esta equação representa as emissões totais depois da produção de SAF através das vias ATJ e FT em combinação com a produção do combustível a jato tradicional, sendo as quantidades de matérias-primas por mês as variáveis. Assim, as funções objetivo $X_{Total}(I_{ATJ}; I_{FT})$, e $C(I_{ATJ}; I_{FT})$ estão definidas, cada uma deverá ser minimizada. Relativamente às restrições deste problema, as restrições superiores (R_1 e R_2) serão os limites reais de recursos, isto é, o máximo mensal de cada recurso disponível em Portugal: 118.08 mil toneladas de sobrantes de milho e 37.33 mil toneladas de resíduos de eucalipto. A escolha destas restrições superiores deriva de que, infelizmente, o país atualmente não reúne as condições necessárias para atingir o máximo teórico de reduções de GEE (42.33% na tabela 23), dado não estarem disponíveis 535 mil toneladas de resíduos lignocelulósicos todos os meses. No que diz respeito à restrição inferior (R_3), o valor de 12.64 mil toneladas mensais de SAF (tabela 24) representaria o mínimo aceitável de acordo com o PNEC2030, assumindo que toda a produção de biocombustíveis sustentáveis avançados estaria alocada à aviação. O problema fica estabelecido no conjunto de equações 29.

$$X_{Total} \text{ (kton CO}_2\text{/mês)} = 615.19 - 0.28 \cdot I_{ATJ} \text{ (kton/mês)} - 0.49 \cdot I_{FT} \text{ (kton/mês)} \quad (28)$$

$$\text{Min: } X_{Total} = 615.19 - 0.28 \cdot I_{ATJ} - 0.49 \cdot I_{FT}$$

$$\text{Min: } C = 40.68 \cdot I_{ATJ} + 51.30 \cdot I_{FT}$$

$$R_1: \quad I_{ATJ} \leq 118.08 \quad (29)$$

$$R_2: \quad I_{FT} \leq 37.33$$

$$R_3: \quad 0.121 \cdot I_{ATJ} + 0.151 \cdot I_{FT} \geq 12.64$$

$$R_4: \quad I_{ATJ} \geq 0$$

$$R_5: \quad I_{FT} \geq 0$$

Às restrições acima mencionadas acrescentam-se ainda as restrições R_4 e R_5 , que graficamente tomam a forma dos eixos, pois a matéria-prima não poderá alguma vez ser negativa. Com o problema de programação linear bem definido, passa-se à resolução gráfica, ilustrada na figura 17.

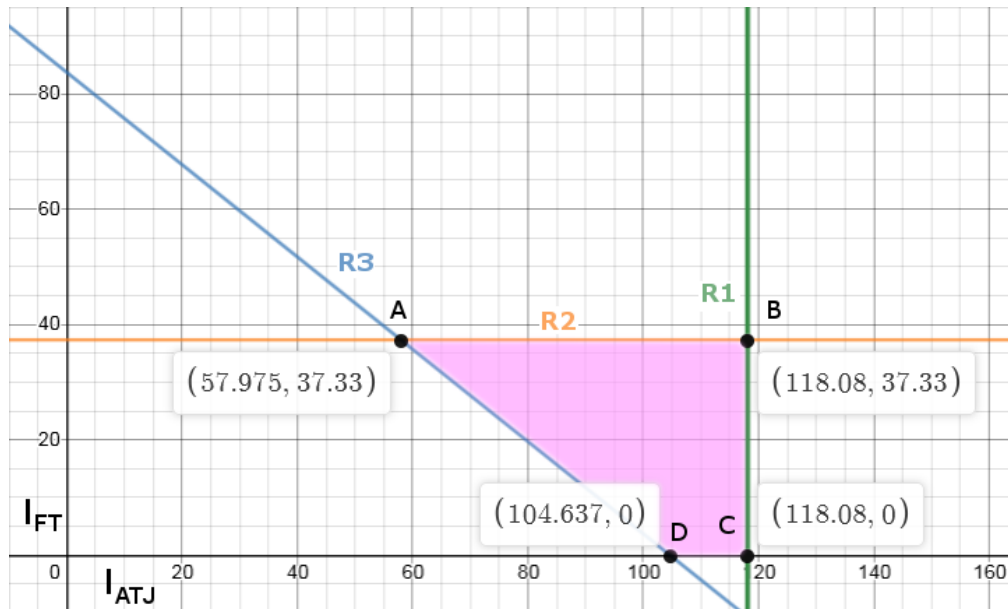


Figura 17 - Resolução gráfica do problema de programação linear, a área rosa representa as soluções viáveis e os vértices são onde poderão ser encontradas as soluções ótimas de cada função objetivo.

Estando os pontos A, B, C e D encontrados, resta apenas aplicar estas coordenadas nas funções objetivo $X_{Total}(I_{ATJ}; I_{FT})$, e $C(I_{ATJ}; I_{FT})$, o que é feito na tabela 28. Da observação da tabela resulta que, como seria de esperar, o ponto que minimiza a função X_{Total} é o ponto B, atingindo assim a maior redução, em percentagem, das emissões de GEE em relação ao pico mensal. Por sua vez, o ponto que minimiza a função C é o ponto D, que implicaria custos mensais de matéria-prima à volta dos 4 milhões de euros. Estando as duas soluções para cada função distantes, torna-se ainda mais importante ter em atenção os outros pontos. Tendo em conta a produção de SAF exclusivamente a partir da via ATJ, o ponto C pode ser caracterizado como uma pequena variação do ponto D, representando custos mais elevados, mas também uma maior redução de emissões, ambos aumentos moderados. Contrariamente, o ponto A, com o custo muito semelhante à minimização da função custo do ponto D, alcança uma redução percentual de emissões de GEE mais atrativa, embora ainda distante da maximização das reduções do ponto B.

Tabela 28 – Soluções do problema de programação linear.

Ponto	I_{ATJ} (kton/mês)	I_{FT} (kton/mês)	C (kEUR/mês)	X_{Total} (ktonCO _{2e} /mês)	Redução de GEE (%)
A	57.98	37.33	4263.58	580.67	5.61
B	118.08	37.33	6708.44	563.84	8.35
C	118.08	0.00	4803.49	582.13	5.37
D	104.64	0.00	4256.76	585.89	4.76

Esta semelhança de custos entre o ponto A (57.98;37.33) e o ponto D (104.64;0) é interessante pois caso se considere a diferença de custos desprezável, o que se verifica caso seja feito um simples arredondamento à unidade das variáveis (58 e 37 kton/mês para o ponto A e 105 kton/mês para o ponto D), o ponto A no contexto deste estudo, dada a superior redução de GEE, seria a solução ótima da função custo. Deste modo, através da observação do gráfico da figura 17, percebe-se que as duas funções objetivo têm soluções ótimas na mesma linha horizontal. Isto significa que, apesar da complexidade inerente de um problema de programação linear com múltiplas funções objetivo, este problema específico poderá ser resolvido de forma simples, com a atribuição, por parte de *stakeholders*, de pesos às funções objetivo, em função da importância e prioridade dos objetivos em causa.

No contexto desta dissertação, a maximização da redução das emissões de GEE da indústria é a prioridade. No entanto, a minimização do custo poderá significar a viabilidade económica das biorrefinarias. Como os dois pontos estão na mesma linha, caso um dia a produção alcance os valores de produção do ponto B, terá de ter passado pelo ponto A. Assim, os pontos A e B serão utilizados para criar 2 cenários (**Cenário 4** e **Cenário 5**, respetivamente). Para tal, o modelo analítico de produção é utilizado outra vez de forma inversa, como se sucedeu para desenvolver o cenário 3. Acrescenta-se que a utilização destes dois cenários é útil pois sendo ambos extremos, representam um intervalo onde existe uma solução ideal, dependente dos *stakeholders*, para a produção de SAF em Portugal.

Para o **cenário 4**, que **minimiza a função custo e cumpre os mínimos energéticos definidos pelo PNEC2030**, baseado no ponto A, o modelo atribui 55.5% da energia produzida à via ATJ e 44.5% à via FT. A produção mensal atinge os 15.67 milhões de litros. Para o **cenário 5**, que **maximiza a função custo e minimiza a função das emissões de GEE**, baseado no ponto B, o modelo atribui 71.7% da energia produzida à via ATJ e 28.3% à via FT. A produção mensal atinge os 24.69 milhões de litros. Os principais resultados destes cenários estão resumidos nas tabelas 29 e 30. No cenário 4 e no cenário 5, o SAF representa 7.80% e 12.35% do pico de produção de combustível a jato. As respetivas reduções de emissões de GEE são de 5.59% e 8.33%, as discrepâncias em relação aos números da tabela 28 devem-se a arredondamentos na elaboração das funções e restrições do problema de otimização.

Considerando que estes dois últimos cenários são mais interessantes, uma comparação mês a mês, com os números da tabela 21 relativos às emissões de GEE será uma análise mais realista das reduções de GEE que cada cenário poderá alcançar, isto porque os picos mensais raramente se verificam. O gráfico da figura 18 ilustra bem este fenómeno, as pequenas diferenças entre cenários nas reduções de emissões de GEE quando comparadas com os picos mensais de produção de origem fóssil, não são as reflexões ideais do que seria a realidade.

A análise numérica que também reflete o que foi discutido no parágrafo anterior e que serviu de base para a figura 18 encontra-se na tabela 31. Os números referentes às médias mensais de

emissões da indústria em Portugal são os mesmos da tabela 21, os números referentes aos cenários foram obtidos de forma análoga à computação da equação 18.

Tabela 29 – Resultados do modelo analítico de produção: Cenário 4.

Cenário 4	Energia (TJ/mês)	Massa (kton/mês)	Volume (milhões de litros/mês)	Emissões de GEE (kton CO _{2e} /mês)	Massa de Matéria-Prima (kton/mês)	Redução de GEE (%)
ATJ	300.57	7.02	8.70	10.52	57.99	
FT	241.00	5.63	6.97	3.30	37.29	
Produção total de SAF	541.57	12.65	15.67	13.82	95.28	
Total	6912.20	161.50	200	580.81		5.59

Tabela 30 – Resultados do modelo analítico de produção: Cenário 5.

Cenário 5	Energia (TJ/mês)	Massa (kton/mês)	Volume (milhões de litros/mês)	Emissões de GEE (kton CO _{2e} /mês)	Massa de Matéria-Prima (kton/mês)	Redução de GEE (%)
ATJ	611.82	14.29	17.70	21.41	118.05	
FT	241.49	5.64	6.99	3.31	37.37	
Produção total de SAF	853.31	19.94	24.69	24.72	155.41	
Total	6912.20	161.50	200	563.96		8.33

Ademais, da análise destes números surge que o cenário 4 fica caracterizado por uma redução mensal mínima na ordem dos 7% e poderá atingir um máximo à volta dos 12%, ficando o valor médio pelos 9.09%. Paralelamente, o cenário 5 fica limitado inferiormente numa redução mensal na ordem dos 10% e atinge o máximo de 18%, com um valor médio de redução de emissões de GEE de 13.54%.

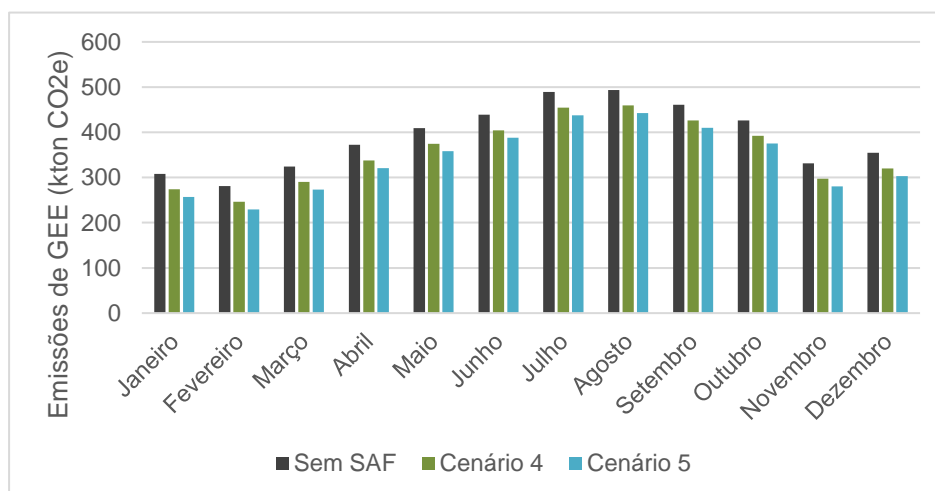


Figura 18 – Comparação gráfica das emissões de GEE da produção de combustível a jato sem SAF, cenário 4 e cenário 5.

Tabela 31 – Comparação numérica das emissões de GEE da produção de combustível a jato sem SAF, cenário 4 e cenário 5.

Cenário	Emissões	Mês											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Atual	Emissões Médias de GEE (kton CO _{2e})	308	281	324	372	409	439	489	494	461	427	331	355
Cenário 4	Emissões Médias de GEE (kton CO _{2e})	274	247	290	338	375	405	455	459	427	392	297	320
	Redução GEE (%)	11	12	11	9	8	8	7	7	7	8	10	10
Cenário 5	Emissões Médias de GEE (kton CO _{2e})	257	230	273	321	358	388	438	442	410	375	280	303
	Redução GEE (%)	17	18	16	14	13	12	10	10	11	12	15	14

É interessante também realizar uma comparação com a metodologia ICAO para contabilizar a redução de emissões alcançadas por um CEF. Assim, aplicam-se à equação 2 os parâmetros da tabela 22 em conjunto com os valores para a produção, em unidades de fluxo de massa para cada via, das tabelas 29 e 30. Deste cálculo surge que o cenário 4, com a metodologia de contabilização da ICAO, resultaria numa redução de emissões de GEE de 28.52 mil toneladas por mês, superior à metodologia deste trabalho em 5.86 kton/mês. Contrariamente, o cenário 5 resultaria numa redução de emissões de GEE de 42.49 kton/mês, inferior à metodologia deste estudo em 8.73 kton/mês. Esta discrepância deve-se ao fator de conversão de combustível da ICAO, FCF, presente na equação 2. O valor deste fator subestima as emissões do combustível para jato de origem fóssil, explicando assim a razão pela qual o aumento da fração de SAF na produção de combustível a jato resultaria numa menor diminuição de emissões, quando comparada com a metodologia deste trabalho.

Quando comparados com biorrefinarias atualmente em construção os cenários 4 e 5 também são promissores. Em relação à via de conversão FT, tanto o cenário 4 como o cenário 5 maximizam o potencial nacional de biomassa lignocelulósica disponível, na forma de resíduos de eucalipto, sendo as estimativas do Plano Nacional para a Promoção das Biorrefinarias conservadoras. Assim, no que toca à via FT, os cenários 4 e 5 são iguais, pelo que analisando os *outputs* em massa e volume da via FT, de qualquer uma das tabelas 29 e 30, através da multiplicação por 12, pode ser feita uma comparação com os valores da tabela 12. Por exemplo, a biorrefinaria em construção pela Red Rock Biofuels, cuja matéria-prima será semelhante em composição aos resíduos de eucalipto, terá, quando finalizada, um rendimento superior ao do modelo analítico de produção utilizado.

Noutro exemplo, a comparação com o projeto Alt Alto indica que os rendimentos da utilização de resíduos urbanos serão semelhantes aos rendimentos da utilização de resíduos lignocelulósicos do modelo analítico de produção, indicando que haverá ainda a oportunidade de recorrer às 209 mil toneladas de resíduos urbanos biodegradáveis (RUB) disponíveis (Pinto *et al.*, 2017). Assim, acrescenta-se que à via FT poderá ser atribuído um aumento da capacidade instalada com as 209 mil toneladas anuais de RUB disponíveis para utilização. Apesar da ausência de dados específicos tanto ao rendimento mássico da via FT utilizando RUB como matéria-prima, como às respetivas emissões padrão, assumindo um rendimento mássico e um padrão de emissões idênticos aos dos resíduos lignocelulósicos, é possível calcular de forma breve um cenário 6. Desta forma, acrescentando como matéria-prima os 17.42 milhares de toneladas mensais de RUB à via FT, atinge-se uma produção de SAF com um acréscimo de 2.63 milhares de toneladas mensais e uma redução total de 9.74% de emissões de GEE, superior à redução de 8.33% do cenário 5. Mais uma vez, a ausência de dados torna inviável produzir um cenário 6 completo dado que as biorrefinarias de RUB e resíduos de eucalipto seriam necessariamente diferentes, com rendimentos mássicos e padrões de emissões diferentes. No entanto essa possibilidade não pode deixar de ser sublinhada, especialmente num contexto de constante inovação. Finalmente e ainda na via FT, na comparação com o projeto Alt Alto, essa biorrefinaria irá utilizar cerca de 500 mil toneladas e produzirá 76 milhões de litros de SAF por ano, enquanto os cenários 4 e 5 consumiriam aproximadamente 447 mil toneladas de matéria-prima e teriam um *output* de 84 milhões de litros, demonstrada assim uma satisfatória semelhança em escala.

Como referido anteriormente, a utilização da via HEFA não é muito promissora apesar de ser essa a tecnologia mais estabelecida. Isto deve-se à extrema competição com a produção de biodiesel mais sustentável, algo que afeta qualquer matéria-prima dessa via e especialmente os OAU. Este contexto explica também o porquê das vias ATJ e FT liderarem as capacidades instaladas em fase de planeamento/construção, apesar de serem tecnologias menos maduras.

Assim, conclui-se que as vias ATJ e FT deverão ser favorecidas na definição de estratégias para a produção de SAF em Portugal. Neste modelo analítico de produção as matérias-primas selecionadas foram os sobrantes de milho e os resíduos de eucalipto, para as vias ATJ e FT, respetivamente.

Ademais, um fator importante para as biorrefinarias é a sazonalidade das matérias-primas. Quando comparada com a sazonalidade da procura de combustível para jato presente na figura 16, as sobrantes de milho enquanto matéria-prima demonstram uma sinergia promissora, pois a colheita de milho dá-se nos meses de verão. Para além disso, na gestão das sazonalidades é útil também ter em conta que o combustível para aviação poderá ser armazenado, facilitando assim a otimização da produção. Dado que nenhum dos cenários 4 e 5 se aproxima do máximo de capacidade instalada de produção mensal de SAF, não deverão ocorrer problemas de excesso de produção.

Finalmente, com base nos argumentos acima explicitados, torna-se pertinente modelar em detalhe os cenários 4 e 5. O cenário 4 representa uma produção mensal média de 15.67 milhões de litros de SAF, o equivalente a 7.80% do máximo da capacidade instalada de combustível para a

aviação. Em termos energéticos, 55.5% desta produção estaria alocada à via ATJ a partir de sobrantes de milho enquanto que os restantes 44.5% seriam satisfeitos pela via FT a partir dos resíduos de eucalipto. Quando se tem em conta a procura média mensal de combustível a jato em Portugal, o cenário 4 fica também caracterizado por uma redução mensal mínima de emissões de GEE na ordem dos 7% podendo ainda atingir um máximo de 12%. O valor médio mensal de redução de GEE ronda os 9.09%. Este cenário minimiza os custos das matérias-primas e aquiesce os requisitos do PNEC2030 para a produção de biocombustíveis avançados. Em relação ao cenário 5, a produção mensal seria de 24.69 milhões de litros, com uma alocação energética de 71.7% à via ATJ e restantes 28.3% à via FT. No que toca à redução de emissões de GEE deste cenário, a redução mensal mínima está na ordem dos 10% e atinge o máximo de 18%, com um valor médio de redução de emissões de GEE de 13.54%. Este cenário maximiza a redução de GEE, a utilização de recursos disponíveis e o seu custo.

3.3 Modelo Tecno-económico

Finalizado o modelo analítico de produção, é importante desenvolver um modelo tecno-económico, capaz de detalhar, passo a passo, a produção de SAF em Portugal. Desta forma, de modo a estudar os cenários 4 e 5 de um ponto de vista mássico e energético, assim como financeiro, foi elaborado um modelo mais completo, descrito nesta secção.

No conceção deste modelo, a ideia base é a utilização, como *input* único, dos resultados do modelo analítico de produção, especificamente a quantidade exata de matéria-prima a ser consumida mensalmente, para satisfazer os cenários 4 e 5. O modelo tecno-económico deve devolver, como *outputs*, os balanços mássicos e energéticos das vias de produção, os requerimentos em termos de outros recursos importantes como hidrogénio e água, eletricidade sobranante (caso seja esse o caso) e dados sobre a viabilidade económica das biorrefinarias consideradas.

O primeiro passo é compreender a simplificação linear da função de produção das centrais energéticas, que neste caso serão especificamente biorrefinarias, cujo principal produto é SAF. Hipoteticamente, depois de finalizada a construção das biorrefinarias, as suas condições de operação e capacidades instaladas estão definidas. Tendo isso em conta e assim desprezando pequenas variações no desempenho das mesmas, é possível estabelecer uma relação linear entre a energia produzida, neste caso na forma de SAF e outros produtos químicos energéticos, e a energia primária introduzida, neste caso contida nas matérias-primas escolhidas. Essa relação é definida conceptualmente na equação 30, onde α representa o parâmetro que define a relação linear entre E_f e E_i , energia produzida e energia introduzida, respetivamente.

$$E_f = \alpha \cdot E_i \quad (30)$$

Na secção anterior, referente ao modelo analítico de produção, os parâmetros que representam a relação linear de cada via de produção são definidos na tabela 22, de forma muito

simplificada, como 0.207 (0.121, em termos práticos) e 0.151 para as vias ATJ e FT, respetivamente, representado o rendimento mássico das cadeias de produção, sendo a energia calculada diretamente a partir do PCI do combustível tradicional para a aviação.

No entanto, na tentativa de compreender os balanços de energia e massa, passo a passo, de cada via de produção, a elaboração do modelo tecno-económico requer uma metodologia heurística para encontrar parâmetros (como por exemplo, através de uma estimativa de Fermi³⁷), dada a ausência de informação específica sobre cada uma das vias. Assim, procura-se alcançar novas estimativas para os rendimentos mássicos destas duas vias, baseadas nas médias dos rendimentos mássicos encontrados na literatura, para cada etapa da via de produção cuja informação se encontre disponível, de forma a atingir a função de produção. Através dos resultados dos balanços de massa são calculados via os respetivos PCI, os balanços energéticos e consequentemente os requerimentos, eletricidade sobranete, eficiências, emissões e viabilidade económica.

3.3.1 Modelo Técnico - ATJ

A base de dados da via de produção ATJ, desenvolvida na secção 2.3.1.4 e contida nas tabelas 17 e 18, permite calcular os rendimentos médios mássicos contidos na tabela 32. Nesta tabela, o rendimento declarado especificamente para a hidrólise foi apenas encontrado num estudo, dedicado à via do etanol. No entanto, assume-se que a hidrólise, tendo o objetivo de extrair a máxima quantidade de celulose e hemicelulose dos sobranetes de milho, é exclusivamente dependente da matéria-prima e sendo assim a via do isobutanol terá o mesmo valor. Da mesma forma, não foi encontrado na base de dados um rendimento específico à destilação, apenas à sua seletividade, assim assumiu-se um rendimento de 0.99, comum ao etanol e isobutanol, sendo a seletividade de produtos a única diferença nessa etapa.

Tabela 32 - Rendimentos mássicos médios das etapas da via ATJ para o etanol (ATJ -E) e isobutanol (ATJ -B).

Etapa	Rendimentos Médios	
	ATJ-E	ATJ-B
Hidrólise	0.5900	
Fermentação	0.4413	0.3495
Desidratação	0.8317	0.9465
Oligomerização	0.9847	0.9334
Hidrogenação	0.9950	
Destilação	0.9900	
SAF	0.6433	0.7000
Diesel	0.1533	0.0000
Gasolina	0.2033	0.3000
($g_{SAF}/g_{açúcar\ fermentável}$)	0.2226	0.2775

Da análise da tabela 32 torna-se claro que esta metodologia heurística para aproximar parâmetros é uma boa ferramenta para desenvolver um modelo que produza resultados semelhantes

³⁷ Análise dimensional através de estimativas justificadas, razoáveis e bem identificadas, popularizada pelo físico Enrico Fermi.

àqueles encontrados na literatura. Por exemplo, da multiplicação de todos os rendimentos médios desde a fermentação até ao produto SAF, obtém-se os valores de 0.2290 e 0.2266 para o etanol e isobutanol, representando erros relativos de 2.88 e 18.34%, respetivamente. O erro relativo superior da via ATJ-B é facilmente explicável pelo facto de que existe apenas um valor para o rendimento mássico de SAF a partir de açúcar fermentável, na tabela 18. O estudo de onde foi retirado esse rendimento apresenta rendimentos consideravelmente elevados para a desidratação, tanto do etanol como do isobutanol (Geleynse *et al.*, 2018), sendo que essa etapa, mais estudada no caso do etanol, tende a apresentar rendimentos mais baixos, como evidenciado na tabela 17, referente ao etanol. Ademais, não existindo muitos estudos que abordem a via ATJ-B, é difícil averiguar se o valor para o rendimento mássico médio de SAF por açúcar fermentável é exagerado ou não. Finalmente, a semelhança entre os valores obtidos para as vias ATJ-E e ATJ-B é expectável em termos práticos, porque a fermentação de etanol terá sempre um rendimento teórico consideravelmente superior, enquanto que o restante processo será mais favorável ao isobutanol, como mencionado na secção 2.3.1.4.

Ainda observando a tabela 32, estendendo a multiplicação dos rendimentos mássicos médios de cada via obtém-se os valores de 0.1351 e 0.1337 para as vias ATJ-E e ATJ-B. O valor utilizado no modelo analítico de produção para o rendimento mássico total desta via foi de 0.121, resultando assim em erros relativos de 11.65 e 10.50%, respetivamente.

Para averiguar ainda mais a robustez dos valores obtidos na tabela 32, comparou-se os valores presentes nas tabelas 17 e 18 e que não foram utilizados no cálculo desta tabela porque englobam conjuntos de rendimentos mássicos. Na tabela 17, o valor de 0.2955 define o rendimento mássico da hidrólise e da fermentação de etanol (Han, Tao and Wang, 2017), multiplicando os rendimentos médios da hidrólise e da fermentação de etanol, chega-se a um rendimento combinado de 0.2604 com um erro relativo de 11.88%. Também na tabela 17, o valor de 0.4800 define o rendimento desde a desidratação ao SAF (Alves *et al.*, 2016), multiplicando os rendimentos médios chega-se a um rendimento combinado de 0.5190 com um erro relativo de 8.13%. Por fim, também na tabela 17, o valor de 0.1100 é utilizado para o rendimento total de SAF a partir de sobrantos de milho (Han, Tao and Wang, 2017), comparando-se com o valor de 0.1351 para a via ATJ-E.

Com o objetivo de uniformizar a linguagem deste trabalho com o que já existe na literatura, as etapas da cadeia de produção ATJ foram divididas e ordenadas em etapas principais que englobam outras: pré-tratamento (mecânico seguido de hidrólise), fermentação, aprimoramento ATJ (desidratação, oligomerização e hidrogenação), produtos (destilação, SAF, diesel e gasolina). A cada uma destas etapas principais fica associado um rendimento geral, resultado da multiplicação das etapas nele incluídas, como exposto na tabela 33. Assumiu-se um rendimento mássico de 95% para o pré-tratamento mecânico.

Estando definidos os rendimentos mássicos das etapas principais da cadeia de produção ATJ, é possível começar a escrever a função de produção. Na equação 31, β representa o rendimento mássico desde a matéria-prima até ao total dos produtos (SAF, diesel e gasolina), M_i e

M_f representam a massa inicial mensal de matéria-prima e a massa final mensal de produtos. Das equações 31 à 36 é descrito o funcionamento do modelo no que às massas diz respeito, com β_{pre} , β_{fer} , β_{ATJ} , β_{SAF} , β_{die} , β_{gas} a representarem os rendimentos mássicos do pré-tratamento, da fermentação, do aprimoramento ATJ, SAF, diesel e gasolina, respetivamente. O mesmo se aplica às massas.

Tabela 33 - Rendimentos das etapas principais da via ATJ.

Etapa Principal	Rendimentos Médios	
	ATJ-E	ATJ-B
Pré-tratamento	0.5605	
Fermentação	0.4413	0.3495
Aprimoramento ATJ	0.8149	0.8790
Produtos	SAF	0.6369
	Diesel	0.1518
	Gasolina	0.2023

$$M_f \text{ (kton/mês)} = \beta \cdot M_i \text{ (kton/mês)} \quad (31)$$

$$M_{pre} \text{ (kton/mês)} = \beta_{pre} \cdot M_i \text{ (kton/mês)} \quad (32)$$

$$M_{fer} \text{ (kton/mês)} = \beta_{fer} \cdot M_{pre} \text{ (kton/mês)} \quad (33)$$

$$M_{ATJ} \text{ (kton/mês)} = \beta_{ATJ} \cdot M_{fer} \text{ (kton/mês)} \quad (34)$$

$$M_f \text{ (kton/mês)} = (\beta_{SAF} + \beta_{die} + \beta_{gas}) \cdot M_{ATJ} \text{ (kton/mês)} \quad (35)$$

$$M_f \text{ (kton/mês)} = (\beta_{SAF} + \beta_{die} + \beta_{gas}) \cdot (\beta_{ATJ} \cdot \beta_{fer} \cdot \beta_{pre}) \cdot M_i \text{ (kton/mês)} \quad (36)$$

Com o conhecimento das massas após cada etapa principal, a multiplicação pelos respetivos PCI permite alcançar os valores energéticos após as respetivas etapas, de acordo com a equação 37 onde E_x é o valor energético do produto da etapa x , descrito pelo produto da quantidade M_x com o PCI_x . A tabela 34 contém os PCI das matérias relevantes, a glucose foi escolhida para representar os açúcares fermentáveis.

O próximo passo é acrescentar as densidades dos três produtos finais (tabela 35) e os requerimentos da tabela 19 ao modelo, assumindo que estes se aplicam também à via do isobutanol.

Tabela 34 - PCI dos produtos e matérias-primas utilizadas na via ATJ.

Produto/Matéria-prima	PCI (TJ/kton)	Fonte
Sobrantes de Milho	17.45	(Huang <i>et al.</i> , 2009)
Açúcares Fermentáveis (Glucose)	14.24	(Phyllis, 2021)
SAF	42.80	(Vásquez, Silva and Castillo, 2017)
Etanol	27.00	(Wang <i>et al.</i> , 2016)
Isobutanol	36.00	
Diesel	43.00	
Gasolina	47.00	
H ₂	120.00	(Gray <i>et al.</i> , 2021)

$$E_x \text{ (TJ/mês)} = PCI_x \text{ (TJ/kton)} \cdot M_x \text{ (kton/mês)} \quad (37)$$

Tabela 35 - Densidades dos produtos finais.

Produtos Finais	Densidades (kg/m ³)	Fonte
SAF	807.5	(Vásquez, Silva and Castillo, 2017)
Diesel	837.0	(Wang <i>et al.</i> , 2016)
Gasolina	770.0	

Com os dados das tabelas 19, 34 e 35 estão praticamente completos os parâmetros da parte do modelo referente à via ATJ. É acrescentado, por fim, o valor padrão das emissões de GEE (F_x) para a via em questão (neste caso ATJ), retirado da tabela 5. A partir das massas obtidas e com as densidades, chega-se ao volume mensal de produtos de forma análoga à equação 14, onde o denominador ρ_x é retirado da tabela 35. O cálculo de consumo de água é direto, assim como o consumo de hidrogénio. Quanto à eletricidade sobranete, depende apenas da quantidade de matéria-prima inserida. O cálculo das emissões descrito na equação 38 é semelhante ao do modelo analítico de produção.

$$X_x \text{ (ktonCO}_{2e}\text{/mês)} = F_x \cdot E_{SAF} \text{ (TJ/mês)} \cdot 1 \cdot 10^{-3} \quad (38)$$

A vantagem da utilização dos dados sobre requerimentos e eletricidade sobranete da tabela 19 surge da escala idêntica, em relação ao cenário 4, do consumo mensal de matéria-prima. O estudo em questão menciona 60 milhares de toneladas mensais (Han, Tao and Wang, 2017), um valor próximo das 57.99 milhares de toneladas de sobranete de milho do cenário 4.

No entanto, a equação 37 não se aplica à etapa dedicada ao aprimoramento ATJ. Isto porque não foi possível definir o PCI dos hidratos de carbono saturados³⁸. Em alternativa, através do cálculo da quantidade de hidrogénio utilizada, E_{H_2} , sabendo que este é introduzido na etapa da hidrogenação, incluída no aprimoramento ATJ, é calculada a quantidade de energia total que entra nesta etapa e não a que sai. Assim, a equação 39 utiliza o requerimento de hidrogénio da tabela 19, R_{H_2} . Dado que o rendimento mássico médio da fase de aprimoramento ATJ é elevado, muito devido

³⁸ Embora a composição dos hidratos de carbono, em massa, possa ser determinada, encontrar os PCI do tetradecano e do hexadecano não foi possível.

ao rendimento elevado da hidrogenação, assume-se que a diferença não será significativa³⁹. Apesar disso, E_{ATJ} deverá ser visto apenas como um valor ilustrativo.

$$E_{ATJ} (TJ/mês) = E_{fer} (TJ/mês) + E_{SAF} (TJ/mês) \cdot R_{H_2} \quad (39)$$

$$\eta_{M_x} = \frac{M_x}{M_i} \quad (40)$$

$$\eta_{E_x} = \frac{E_x}{E_i + E_{H_2}} \quad (41)$$

$$\eta_{M_f} = \frac{M_f}{M_i} \quad (42)$$

$$\eta_{E_f} = \frac{E_f + E_{ele}}{E_i + E_{H_2}} \quad (43)$$

Finalmente, das equações 40 à 43 são definidas as eficiências da via ATJ. A equação 40 é a eficiência mássica de um produto final, x , enquanto que a equação 42 é a eficiência mássica total. Analogamente, a equação 41 é a eficiência energética de um produto final, x , enquanto que a equação 43 é a eficiência energética total, assumindo eletricidade sobranete E_{ele} e incluindo o hidrogénio introduzido na etapa de aprimoramento ATJ, E_{H_2} .

3.3.2 Modelo Técnico – Via FT

Em contraste com a via ATJ, a literatura existente não permite construir bases de dados sobre a via FT, sobretudo tendo em conta a gaseificação de resíduos de eucalipto. Assim, estimativas de Fermi baseadas nos valores médios extraídos da literatura seriam infrutíferos. Ademais, a via FT é sem dúvida mais complexa, algo já abordado neste trabalho e evidente sob a comparação das subsecções referentes à via ATJ e FT, na secção 2.3. Enquanto que a via ATJ é de *design* linear, a via FT oferece variações que implicam decisões fundamentais como por exemplo o agente oxidante, tipo de gaseificador, composição de *syngas* desejada e catalisadores da reação FT.

Dado que existem várias incógnitas no *design*, e que a matéria-prima a utilizar já está determinada, é por aí que deverá ser abordada a elaboração desta parte do modelo. A conceptualização do modelo das biorrefinarias, definida na equação 30, é utilizada outra vez, com a

³⁹ Se o único hidrato de carbono na composição fosse o n-dodecano (PCI de 44.467 (Turns, 2012)) o erro relativo seria de 6.43%.

parametrização a ser representada por α . Assim, importa agora estabelecer etapas principais desta via e ordená-las: pré-tratamento (mecânico), gaseificação, limpeza de gás, reação FT e destilação (hidrogenação seguida de destilação para SAF, diesel e gasolina).

Estabelecidas as etapas principais, o próximo passo é determinar os rendimentos mássicos de cada uma delas. À semelhança do que foi feito para a via ATJ, o pré-tratamento mecânico tem um rendimento assumido de 95%. A gaseificação é a próxima etapa e da análise da tabela 9, em conjunto com as equações 5 e 7 surge que a *cold gas efficiency* e a *carbon conversion efficiency* têm de estar em concordância. Calculando \dot{m}_{syngas} em milhares de toneladas por mês, chega-se ao rendimento mássico desta etapa. Tendo em conta que a CGE e a CCE são dependentes uma da outra, definir um valor dentro dos intervalos da tabela 11 para a CGE (50 a 80%) irá resultar num valor para a CCE e estando também esse valor dentro do intervalo da tabela 11 para a CCE (90 a 99%), haverá concordância. No entanto, há 3 termos desconhecidos nas equações 5 e 7: \dot{m}_{syngas} , PCI_{syngas} e $\dot{m}_{carbono(syngas)}$.

Para determinar os 3 termos desconhecidos, é inevitável recorrer à literatura. No entanto, devido à inexistência de opções, está assim feita a primeira decisão que influencia o *design* desta biorrefinaria, a tabela 36 contém as frações volúmicas, mássicas e molares da composição do *syngas* proveniente da gaseificação de resíduos de eucalipto num reator de leixo fixo com escoamento descendente e utilizando o ar atmosférico como agente oxidante. Embora a razão molar H_2/CO seja inferior à ideal, a composição de gás de síntese da tabela 36 é a única que foi encontrada e consequentemente as características da gaseificação do estudo serão as utilizadas nesta parte do modelo.

Tabela 36 - Composição de *syngas* proveniente da gaseificação de resíduos de eucalipto (adaptado) (Nwokolo, Mukumba and Obileke, 2020)

Fração	H ₂	CO	CH ₄	CO ₂	N ₂
Volúmica (%)	22.50	24.20	2.10	9.70	41.50
Mássica (%)	1.90	28.90	1.40	18.20	49.50
Molar (%)	22.88	24.71	2.06	9.84	40.50

$$PCI_{syngas} (TJ/kton) = \frac{PCI_{CO} \cdot M\%_{CO} + PCI_{H_2} \cdot M\%_{H_2} + PCI_{CH_4} \cdot M\%_{CH_4}}{100} \quad (44)$$

Conjugando os valores da tabela 36 com a equação 44 (Nwokolo, Mukumba and Obileke, 2020) e os PCI de 50.016 e 10.112 para o metano e para o monóxido de carbono (Turns, 2012), respetivamente, assim como o valor tabelado acima para o PCI do hidrogénio, é possível calcular o PCI do gás de síntese obtido. Assim, PCI_{syngas} é igual a 5.90 terajoule por quilotonelada ou megajoule por quilograma. Este valor está enquadrado no previsto para matéria-prima lenhosa, de acordo com a secção 2.3.1.1 deste trabalho.

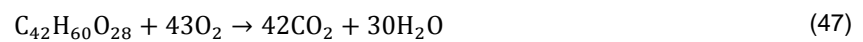
Com o PCI_{syngas} determinado, segue-se o cálculo do fluxo de carbono, em massa, no gás de síntese. No entanto, esse valor depende de \dot{m}_{syngas} , como demonstrado na equação 45, onde os termos $\%_{C_x}$ representam as frações mássicas de carbono nas respectivas moléculas. Estes termos foram calculados utilizando a massa atômica do carbono (12.01), e as massas moleculares do monóxido de carbono (28.01), dióxido de carbono (44.01) e metano (16.05). Acrescentam-se as frações mássicas na composição do gás de síntese, declaradas na tabela 36 e atinge-se a simplificação da equação 46.

$$\dot{m}_{carbono(syngas)} = \dot{m}_{syngas} \cdot \frac{(M\%_{CO} \cdot \%_{CCO} + M\%_{CH_4} \cdot \%_{CCH_4} + M\%_{CO_2} \cdot \%_{CCO_2})}{100} \quad (45)$$

$$\dot{m}_{carbono(syngas)}(TJ/kton) = \dot{m}_{syngas} \cdot 0.1841 \quad (46)$$

Estando $\dot{m}_{carbono(syngas)}$ definido em função de \dot{m}_{syngas} , que por sua vez está definido em função de CGE, e estando CCE definido em função de $\dot{m}_{carbono(syngas)}$, a atribuição de um valor a CGE permite caracterizar ambas as eficiências e ambos os fluxos mássicos de gás de síntese e de carbono no gás de síntese. Sendo assim, optou-se por utilizar o modelo para atribuir o mínimo valor possível à eficiência CGE que minimize a CCE, mas que mantenha os dois resultados consistentes, de modo a não sobrestimar os resultados futuros do modelo. Assim, uma CGE de 0.74 devolve uma CCE de 0.90, minimizando o intervalo aceitável para a CCE.

No entanto, a etapa da gaseificação não está ainda concluída pois é necessário averiguar a quantidade de ar necessária para realizar a operação. Para tal, é necessário calcular a razão estequiométrica entre o ar e a biomassa. Mais uma vez, recorrendo à massa atômica do carbono (12.01), mas também à massa atômica do hidrogénio (1.01), conjuntamente com a equação estequiométrica da combustão de madeira (assumidamente aplicável aos resíduos de eucalipto) descrita na equação 47 (Kubler, 1991) e recorrendo também à massa atômica do oxigénio (16.00) chega-se à quantidade necessária de O_2 (massa molecular de 32) para 100 grama de biomassa, calculado em 48. Sabendo essa relação e assumindo que a percentagem de O_2 no ar, em massa, é de 23%, chega-se a uma razão estequiométrica entre o ar e a biomassa de 5.91.



$$\frac{100 (g \text{ resíduos de eucalipto}) \times 1376 g O_2}{1013.2 (g \text{ resíduos de eucalipto})} = 135.83 g O_2 \quad (48)$$

Para descobrir a razão real entre o ar e a biomassa, é fundamental recorrer à equação 4, mas para a utilizar é necessário assumir um valor para a razão de equivalência \emptyset . Através da comparação

entre a figura 10 e as frações molares do gás de síntese na tabela 36, assume-se um ϕ de 0.26. Assim, a equação 4 devolve o valor aproximado de 1.54 para a razão real entre o ar e a biomassa. Isto justificará, na discussão de resultados, a superioridade da massa do gás de síntese em relação à massa de resíduos de eucalipto.

Entre a gaseificação e a reação FT, dá-se a limpeza de *syngas*, para a qual se assumiu um rendimento de 90%. Se o catalisador metálico da reação FT for o cobalto, a razão molar H_2/CO do gás de síntese (0.93) não é a adequada, sendo necessárias reações *water-gas shift* nesta fase. Caso o catalisador seja o ferro, a razão molar de 0.93 é suficiente. Em relação à reação FT, assumindo que o dióxido de carbono contido no *syngas* é reciclado de volta ao gaseificador, pode aplicar-se a equação 49, referente à conversão de passagem única do monóxido de carbono X_{CO} (Gruber *et al.*, 2019).

$$X_{CO} = \frac{\dot{m}_{carbono(syngas)} - \dot{m}_{FT}}{\dot{m}_{carbono(syngas)}} \quad (49)$$

Assumindo um X_{CO} de 0.40, comum na literatura (Klein *et al.*, 2018), determina-se o valor de \dot{m}_{FT} , em milhares de toneladas por mês, como função do fluxo de carbono no gás de síntese. Neste modelo, \dot{m}_{FT} representa o fluxo mássico mensal de líquidos produzidos na síntese FT. Estes líquidos são submetidos a um processo de hidrogenação que requer 0.10 grama de hidrogénio por grama de cera FT (Alves *et al.*, 2016). Finalmente, assume-se que a hidrogenação tem um rendimento mássico semelhante ao da via ATJ, de 99.5% e, da mesma maneira, um rendimento de 99% para a destilação. Na ausência de distribuições percentuais dos produtos da destilação, o modelo utiliza a distribuição da via ATJ para o etanol, disponível na tabela 33, e que já engloba o rendimento da destilação. Obtido o fluxo mássico mensal de SAF oriundo da via FT, aplica-se a equação 38 com o respetivo padrão de emissões GEE, retirado da tabela 5.

Finalizada a modelação dos fluxos de massa da via FT, o último passo é a multiplicação pelos respetivos PCI, nomeadamente dos resíduos de eucalipto, gás de síntese, hidrogénio, SAF, gasolina e diesel. Por fim, as eficiências desta parte do modelo são definidas de forma análoga ao conjunto de equações 40 a 43, sendo a única diferença a ausência de eletricidade sobranante, dado que não se conseguiu encontrar informação aplicável. O mesmo se sucedeu aos requerimentos de água. No entanto, ainda sobre a eletricidade, como as biorrefinarias seriam integradas, a eletricidade sobranante da inceneração da lenhina na via ATJ poderá ser utilizada, caso necessário, na via FT.

3.3.3 Modelo Económico

No contexto deste trabalho é relevante compreender a viabilidade económica das biorrefinarias em questão. Para tal, uma vez que a metodologia da modelação energética e mássica foi heurística, uma abordagem também heurística é a melhor opção e favorece o pragmatismo deste trabalho, de aproximação inicial. Neste âmbito, para que seja possível fazer uma estimativa

minimamente realista dos custos associados às biorrefinarias é aplicada a técnica heurística conhecida como lei das potências, explícita na equação 50 (Tsagkari *et al.*, 2016). A lei das potências é útil pois permite obter os custos das biorrefinarias em causa a partir dos custos de biorrefinarias semelhantes descritas na literatura, desde que a escala, por exemplo em termos de matéria-prima consumida mensalmente, esteja também disponível. Na equação 49, c representa um determinado custo, s é a escala, p é a potência que descreve a relação de escalas, 0.84 neste trabalho⁴⁰ (Tsagkari *et al.*, 2016), e t é um fator de correção que, entre outras coisas, tem em conta a inflação e o cambio de moeda.

$$\frac{c_1}{c_2} = \left(\frac{s_1}{s_2}\right)^p \cdot t \quad (50)$$

Tabela 37 - Parâmetros aplicados na extrapolação da via ATJ através da lei das potências.

Parâmetro	ATJ-E	ATJ-B	Unidade	Fonte
Escala (s_2)	435.00		Tonelada de açúcar fermentável / dia	(Geleynse <i>et al.</i> , 2018)
CAPEX	77.40	74.60	Milhões de \$	
OPEX	15.80	16.50	Milhões de \$ / ano	
t	0.89			
p	0.84			(Tsagkari <i>et al.</i> , 2016)

Ainda sobre a equação 50, um p de 0.84, menor do que 1, indica que as biorrefinarias em questão apresentam uma economia de escala favorável (Tsagkari *et al.*, 2016) algo que vai de encontro ao que foi mencionado na secção 2.3, desde que não se ultrapassem os 80 milhares de toneladas de SAF por mês, por biorrefinaria. Isto não se verifica em nenhum dos cenários abordados pelo modelo tecno-económico. A tabela 37 contém os parâmetros inseridos na extrapolação da via ATJ com a lei das potências, s_1 é determinado via conversão simples assumindo 30 dias num mês. Analogamente, a tabela 38 mostra os parâmetros a utilizar na lei das potências referente à via FT, sendo s_1 neste caso equivalente a 37.37 milhares de toneladas por mês, de acordo com os cenários 4 e 5.

Da aplicação da lei das potências a cada uma das vias, alcançam-se o CAPEX e o OPEX. Como o modelo tecno-económico precisa a quantidade mensal de produtos, se forem definidos valores para preços de venda pode calcular-se facilmente as receitas anuais. Idem, uma vez que o modelo tecno-económico também precisa a quantidade de recursos utilizados mensalmente. se forem definidos valores para preços de compra dos recursos consumidos, isto é, do hidrogénio e da matéria-prima, facilmente se obtém os custos anuais através da soma com os respetivos valores de OPEX. Assim estes parâmetros são estabelecidos na tabela 39, sendo que os preços dos sobrantes de milho e resíduos de eucalipto tinham sido definidos anteriormente e os restantes, excluindo o hidrogénio⁴¹, aproximações dos preços verificados no mês de abril de 2021, no contexto do país.

⁴⁰ Sendo 0.84 o valor médio entre o intervalo de valores adequado para este trabalho, de acordo com o estudo.

⁴¹ Valor definido em função do preço médio expectável do hidrogénio de origens renováveis no país.

Tabela 38 - Parâmetros aplicados na extrapolação da via FT através da lei das potências.

Parâmetro	FT	Unidade	Fonte
Escala (s_2)	85.70	Milhares de toneladas matéria-prima / mês	(Jong <i>et al.</i> , 2015)
CAPEX	327.00	Milhões de \$	
OPEX	65.40	Milhões de \$ / ano	
t	0.94		
p	0.84		(Tsagkari <i>et al.</i> , 2016)

Definidos o CAPEX (It), as receitas (R) e as despesas (D) anuais, é possível desenvolver o modelo tecno-económico para fazer a caracterização da viabilidade económica das biorrefinarias. Assumindo que as receitas e despesas anuais são constantes durante o tempo de vida das biorrefinarias, e que o investimento inicial é feito no ano 0, o VAL pode ser definido pela equação 51. Nessa equação, o Ka é função da taxa de atualização (r) associada ao projeto no seu tempo de vida em anos (n), como descrito na equação 52. Para finalizar o modelo, a TIR é determinada na equação 53 assumindo as mesmas circunstâncias da equação 51 referente ao VAL. No entanto, como a equação 53 não é linear é obrigatório fazer a sua resolução iterativamente via método de Gauss, como descreve a equação 54.

Tabela 39 - Preços associados aos produtos e recursos do modelo tecno-económico.

Material	Preço	Unidade
Sobrantes de milho	40.68	EUR / tonelada
Resíduos de eucalipto	51.30	
Hidrogénio	4.00	EUR / quilograma
SAF	0.40	EUR / litro
Gasolina	1.50	
Diesel	1.40	
Eletricidade	0.15	EUR / kWh

$$VAL (MEUR) = (R - D)Ka - It \quad (51)$$

$$Ka = \sum_{j=1}^n \frac{1}{(1+r)^j} = \frac{(1+r)^n - 1}{r \cdot (1+r)^n} \quad (52)$$

$$(R - D) \cdot \frac{(1 - TIR)^n - 1}{TIR \cdot (1 - TIR)^n} = It \quad (53)$$

$$TIR^{(k+1)} = \frac{(R - D)}{It} \cdot \frac{(1 + TIR^k)^n - 1}{(1 + TIR^k)^n} \quad (54)$$

Finalmente, para completar o modelo é necessário introduzir uma taxa de atualização para o projeto e o respetivo tempo de vida em anos. Foram definidos os valores de 10% para o r e 30 anos para o n , em concordância com os estudos mencionados na secção 2.3.1.3. Para terminar, igualando

a zero o VAL, na equação 51, e resolvendo a mesma em função do preço do SAF por litro, chega-se ao MSAFSP (do inglês, *Minimum SAF Selling Price*). Essa é uma métrica útil pois indica o preço mínimo a que o SAF deverá ser vendido para que a biorrefinaria em questão possa ser economicamente viável.

3.3.4 Modelo Tecno-económico - Discussão de Resultados

Dada a natureza proprietária das novas tecnologias desenvolvidas na produção de SAF, encontrar grandes conjuntos de dados é impraticável. Assim, utilizou-se uma metodologia heurística para desenvolver o modelo tecno-económico.

Para a via ATJ, tanto do etanol como do isobutanol, foi possível criar uma pequena base de dados com 2 tabelas (tabela 17 e tabela 18) que reúnem os rendimentos mássicos encontrados na literatura para cada etapa da cadeia de produção. A partir dessa base de dados, chegou-se à tabela 33 que estabelece os rendimentos mássicos médios das etapas principais da via ATJ. Essa tabela, que mostra o que foi mencionado na secção 2.3 acerca da dificuldade da fermentação do isobutanol relativamente ao etanol, e, em contraste, a mais favorável seletividade do isobutanol ao longo da fase final da cadeia de produção, permite estabelecer o fluxo de massa mensal de toda a cadeia. A partir desse balanço de massas e com os PCI bem definidos, faz-se um balanço de energia, sem esquecer a necessária adição de hidrogénio e a exportação de eletricidade. Acrescentam-se ainda o consumo de água e a emissão de GEE.

Em contrapartida, a via FT, naturalmente mais complexa do que a via ATJ, revelou-se mais difícil de modelar. Primeiramente, apenas se encontrou uma composição de gás de síntese referente ao eucalipto como matéria-prima. Essa exclusividade implicou que a modelação fosse feita com base no comportamento de um gaseificador de leito fixo com escoamento descendente cujo agente oxidante é o ar atmosférico.

Alguns dos aspetos negativos deste *design* são a relativamente baixa, mas não totalmente impeditiva, razão molar entre o hidrogénio e o monóxido de carbono no gás de síntese, a baixa qualidade do gás de síntese devido à utilização de ar atmosférico e o facto de que em termos práticos um gaseificador de leito fixo com escoamento descendente não terá a capacidade para satisfazer a quantidade de matéria-prima introduzida mensalmente (tabela 10). No entanto, alguns aspetos positivos são a facilidade no fabrico deste tipo de gaseificador (Nwokolo, Mukumba and Oibileke, 2020), diminuição de custos ao utilizar ar atmosférico como agente oxidante e a possibilidade de obter melhores rendimentos dado que o mais promissor para a produção de SAF parece ser o gaseificador de leito fluidizado (Shahabuddin *et al.*, 2020).

Utilizando o conhecimento reunido na secção 2.3.1.1, referente à gaseificação, do estado da arte, foi possível dar robustez a esta parte do modelo através do cálculo das eficiências CGE e CCE. Analogamente a razão de equivalência também encaixa na modelação feita. A partir dos fluxos de massa da gaseificação, determinar os outros rendimentos mássicos foi relativamente simples, sendo a parte final da via FT semelhante à da via ATJ. Estando os rendimentos mássicos definidos, os

balanços de massa são imediatos e conseqüentemente, via aplicação dos PCI, os balanços de energia também.

Assim, o modelo tecno-económico, que assume circunstâncias constantes nas condições de operação das 3 biorrefinarias conceptualizadas, após a sua construção, de modo a que as respetivas funções de produção possam ser linearmente simplificadas, necessita apenas dos *inputs* retirados do **modelo analítico de produção**: 57.99 milhares de toneladas mensais de sobranes de milho para a via ATJ e 37.29 milhares de toneladas mensais de resíduos de eucalipto para a via FT, no **cenário 4** e, 118.05 milhares de toneladas mensais de sobranes de milho para a via ATJ e 37.37 milhares de toneladas mensais de resíduos de eucalipto para a via FT, no **cenário 5**. O modelo devolve ao utilizador balanços de massa, energia, eficiências mássicas e energéticas, consumos de hidrogénio e água, exportação de eletricidade (caso seja o caso), emissões de GEE e, finalmente, caracterizações da viabilidade económica, em circunstâncias idênticas para permitir comparações, das 3 biorrefinarias em questão (ATJ-E, ATJ-B e FT), nos 2 cenários obtidos da utilização do modelo analítico de produção na secção 3.2.

A tabela 40 contém os balanços de massa e de energia das vias ATJ, nas duas biorrefinarias ATJ-E e ATJ-B, caracterizadas pelo etanol e isobutanol, respetivamente. A quantidade mensal de matéria-prima consumida é de 57.99 milhares de toneladas por mês, dado que se trata do cenário 4. A primeira diferença ocorre na etapa da fermentação, onde na via ATJ-E há mais massa, mas menos energia devido às diferenças nos PCI dos álcoois. De seguida, na fase do aprimoramento ATJ, há um aumento de energia que não quebra nenhuma lei termodinâmica porque se trata da adição de hidrogénio na etapa da hidrogenação, como mencionado anteriormente. A via ATJ-E, que necessita de mais hidrogénio, aproxima-se energeticamente da via ATJ-B. Após a saturação dos hidratos de carbono, dá-se a destilação para os produtos finais com a via ATJ-E a ser superior em termos de massa e energia, apesar de terem resultados semelhantes.

Tendo em conta os dados da tabela 40, os resultados demonstrados na tabela 41 não são surpreendentes. A biorrefinaria ATJ-E domina em todas as eficiências excluindo as referentes à gasolina, mais um exemplo da superior seletividade do isobutanol. Ademais, é interessante reparar que em termos de eficiências energéticas e mássicas exclusivas aos SAF, as duas biorrefinarias estão muito próximas, outra evidência a favor do equilíbrio entre as duas devido à fermentação vantajosa do etanol e da seletividade superior do isobutanol.

No que toca à vertente financeira do modelo, a tabela 42 revela que a biorrefinaria ATJ-E é superior à ATJ-B nas despesas e custos anuais. No entanto, tendo em conta que as duas têm a mesma escala, e que a biorrefinaria ATJ-E tem um balanço anual mais favorável apesar de consumir mais hidrogénio, é possível afirmar que é a via mais eficiente em termos económicos, mássicos e energéticos. Isto deve-se não tanto ao rendimento mássico subtilmente superior da via ATJ-E, mas sim ao facto de que o preço do combustível para aviação é muito mais barato do que a gasolina ou o diesel, pelo que a biorrefinaria que produzir menos SAF (em termos relativos à destilação) terá uma vantagem económica. Daí, não é surpreendente que, como estabelecido na tabela 43, a biorrefinaria

ATJ-E seja dominante em todos os parâmetros de viabilidade econômica. Deve dar-se especial atenção ao MSAFSP de 0.265 EUR/L que implica que a biorrefinaria ATJ-E é já hoje muito competitiva. Igualmente, o MSAFSP de 0.429 EUR/L indica também que a biorrefinaria ATJ-B poderá atingir um VAL positivo em breve, estando muito próximo do preço atualmente praticado.

Tabela 40 - Balanços de massa e de energia para a via ATJ do modelo tecno-econômico, cenário 4.

Etapa	Produto	ATJ-E		ATJ-B	
		Massa (kton/mês)	Energia (TJ/mês)	Massa (kton/mês)	Energia (TJ/mês)
Matéria-prima	Sobrantes de milho	57.99	1011.93	57.99	1011.93
Pré-tratamento	Açúcares fermentáveis	32.50	462.85	32.50	462.85
Fermentação	Etanol/isobutanol	14.34	387.28	11.36	408.96
Aprimoramento ATJ	Hidratos de carbono saturados	11.69	555.51	9.99	565.34
Destilação	SAF	7.44	318.61	6.92	296.17
	Gasolina	1.77	83.38	2.97	139.39
	Diesel	2.35	101.16	0.00	0.00
	Total	11.57	550.33	9.89	482.74

Tabela 41 - Eficiências do modelo tecno-econômico, cenários 4 e 5.

Biorrefinaria	Eficiência	SAF	Gasolina	Diesel	Total
ATJ-E	η_{M_x} (%)	12.53	2.99	3.96	19.48
	η_{M_e} (%)	26.70	7.06	8.57	50.63
ATJ-B	η_{M_x} (%)	11.67	5.00	0.00	16.67
	η_{M_e} (%)	25.35	11.93	0.00	45.36
FT	η_{M_x} (%)	15.31	4.86	3.65	23.82
	η_{M_e} (%)	30.81	10.75	7.38	48.94

Tabela 42 - Custos e receitas das biorrefinarias ATJ no cenário 4.

Resultados econômicos		ATJ-E	ATJ-B	Unidades
Custos	CAPEX	148.26	142.90	MEUR/ano
	OPEX	30.27	30.94	
	Matéria-prima	28.31	28.31	
	Hidrogênio	67.29	62.55	
	Despesas anuais	125.85	121.80	
Receitas	SAF	44.25	41.13	MEUR/ano
	Gasolina	41.47	69.33	
	Diesel	47.22	0.00	
	Eletricidade	23.59	23.59	
	Receitas anuais	156.53	134.05	

Tabela 43 - Parâmetros de viabilidade econômica das biorrefinarias ATJ, cenário 4.

Parâmetros	ATJ-E	ATJ-B	Unidades
K_a	9.427		
VAL	140.808	-27.374	MEUR
MSAFSP	0.265	0.429	EUR/L
TIR	20.607	7.632	%

A tabela 44 revela ter os mesmos padrões descritos sobre a tabela 40, o que faz sentido tendo em conta a conceptualização de simplificação linear da função de produção das biorrefinarias, resultando também nas equivalências das eficiências dos cenários 4 e 5.

Tabela 44 - Balanços de massa e de energia para a via ATJ do modelo tecno-económico, cenário 5.

Etapa	Produto	ATJ-E		ATJ-B	
		Massa (kton/mês)	Energia (TJ/mês)	Massa (kton/mês)	Energia (TJ/mês)
Matéria-prima	Sobrantes de milho	118.05	2059.97	118.05	2059.97
Pré-tratamento	Açúcares fermentáveis	66.17	942.22	66.17	942.22
Fermentação	Etanol/isobutanol	29.20	788.39	23.13	832.51
Aprimoramento ATJ	Hidratos de carbono saturados	23.80	1130.84	20.33	1150.85
Destilação	SAF	15.15	648.59	14.09	602.91
	Gasolina	3.61	169.73	6.04	283.75
	Diesel	4.79	205.93	0.00	0.00
	Total	23.56	1120.30	20.12	982.71

Tabela 45 - Custos e receitas das biorrefinarias ATJ no cenário 5.

Resultados económicos		ATJ-E	ATJ-B	Unidades
Custos	CAPEX	269.37	259.63	MEUR
	OPEX	54.99	56.21	MEUR/ano
	Matéria-prima	57.63	57.63	
	Hidrogénio	136.98	127.34	
	Despesas anuais	249.60	241.17	
Receitas	SAF	90.08	83.74	
Receitas	Gasolina	84.42	141.13	
	Diesel	96.12	0.00	
	Eletricidade	48.02	48.02	
	Receitas anuais	318.65	272.89	

Por sua vez, a análise da tabela 45 evidencia que as economias de escala das biorrefinarias são uma grande vantagem em termos financeiros, tornando ainda maior o balanço positivo entre receitas e despesas anuais, especialmente no caso da biorrefinaria ATJ-E. A tabela também clarifica aquela que é a primeira discrepância em relação à literatura, que normalmente atribui as maiores percentagens de despesas à matéria-prima. Pelo contrário, o hidrogénio parece ser, de longe, a principal despesa anual, representando uma fatia de 54.88 e 52.80% nas biorrefinarias ATJ-E e ATJ-B, respetivamente. A diferença deve-se à utilização de hidrogénio com origem fóssil, quase 3 vezes mais barato, na maior parte dos estudos feitos. A tabela 46 mostra a importância das economias de escala, atribuindo um VAL de aproximadamente 382 milhões de euros à biorrefinaria ATJ-E e uma TIR de 25.6%. Os MSAFSP também ficaram mais competitivos, sendo a biorrefinaria ATJ-B também beneficiada pelas economias de escala e atingindo um VAL positivo com uma TIR de cerca de 11.8%.

Tabela 46 - Parâmetros de viabilidade económica das biorrefinarias ATJ, cenário 5.

Parâmetros	ATJ-E	ATJ-B	Unidades
Ka	9.427		
VAL	381.529	39.371	MEUR
MSAFSP	0.220	0.380	EUR/L
TIR	25.605	11.785	%

Analisando a tabela 47 percebe-se que no que aos consumos e eletricidade diz respeito, a biorrefinaria ATJ-B tem uma performance ligeiramente melhor. No entanto, ao contrário do que pode parecer, a performance da via ATJ-E em termos de emissões de GEE será competitiva. Isto deve-se sobretudo às deslocações ligeiramente superiores que provoca nas emissões do combustível a jato fóssil, pois em proporção (função do elevado padrão de emissões de GEE do combustível fóssil) aproximam-se das emissões diretas a mais, relativas à biorrefinaria ATJ-B.

Tabela 47 – Parâmetros sobre consumos e emissões da via ATJ, cenários 4 e 5.

Parâmetros	Cenário 4		Cenário 5		Unidades
	ATJ-E	ATJ-B	ATJ-E	ATJ-B	
Hidrogénio	168.22	156.38	342.46	318.34	TJ/mês
Água	56.23	52.27	114.48	106.41	ML/mês
Eletricidade sobranete	13.11		26.68		GWh/mês
Emissões de GEE	11.15	10.36	22.70	21.10	ktonCO _{2e} /mês

Assim, torna-se claro que a biorrefinaria ATJ-E é também em termos ambientais e sobretudo económicos vantajosa, especialmente quanto maior for a sua escala. No entanto, caso as circunstâncias do mercado do combustível fóssil para a aviação se alterem, a biorrefinaria ATJ-B ficaria mais competitiva, sendo ainda necessário ter em conta quaisquer futuras inovações que melhorem os rendimentos das duas.

No que toca à via FT, sendo de biorrefinaria única e tendo a mesma escala (as pequenas diferenças nos cenários 4 e 5 devem-se a arredondamentos) nos dois cenários, determinou-se que o *input* de 37.37 milhares de toneladas mensais será o utilizado. A tabela 48 contém os balanços de massa e de energia. O aumento do fluxo de massa na gaseificação deve-se ao agente oxidante, o ar. Recorrendo à equação 4 com \emptyset equivalente a 0.26, como parametrizado, o modelo tecno-económico devolve 1.54 como razão real entre o ar e a biomassa, o que implica que são introduzidas 57.55 milhares de toneladas de ar por mês, na etapa da gaseificação, equilibrando assim o respetivo balanço mássico (um rendimento mássico de 90% na etapa da gaseificação considerando a massa de ar e de biomassa a entrar). Seguem-se a síntese FT, cujo PCI é impossível de determinar sem caso de estudo e a destilação, semelhante em tudo à mesma etapa da via ATJ.

Em relação às eficiências da via FT, a tabela 41 serve também para comparar com as eficiências da via ATJ, tanto do etanol como do isobutanol. Neste contexto a performance da biorrefinaria FT apresenta as mais altas eficiências mássicas de SAF, gasolina e totais. Da mesma forma, apresenta também as melhores eficiências energéticas de SAF e gasolina. Ou seja, a biorrefinaria FT é mais eficiente no que aos produtos químicos energéticos diz respeito, sendo a exceção à regra a eficiência referente ao diesel, ultrapassada pela biorrefinaria ATJ-E, provavelmente devido ao efeito da eletricidade sobranete no caso da via dos álcoois. Como não existe forma adequada para averiguar se há um excedente de eletricidade na via FT, que contém na gaseificação reações exotérmicas, como mencionado na secção 2.3.1.1, as suas eficiências poderão ser melhores. No entanto, o contrário também se pode verificar, sendo que nesse caso a integração das

biorrefinarias seria uma mais valia pela utilização *in situ* da eletricidade excedente da via ATJ (que representa 4% da energia total inserida no sistema ATJ-E).

Tabela 48 - Balanços de massa e de energia para a via FT do modelo tecno-económico, cenários 4 e 5.

Etapa	Produto	FT	
		Massa (kton/mês)	Energia (TJ/mês)
Matéria-prima	Resíduos de eucalipto	37.37	703.30
Pré-tratamento	Resíduos de eucalipto pré-tratados	35.50	668.14
Gaseificação	Gás de Síntese	83.76	494.42
	$\dot{m}_{\text{carbono(syngas)}}$	15.42	
FT	Hidratos de carbono saturados	9.25	
Destilação	SAF	5.86	250.90
	Gasolina	1.86	87.51
	Diesel	1.40	60.08
	Total	9.12	398.50

Relativamente à vertente financeira, a biorrefinaria FT, como demonstra a tabela 49, tem a margem de lucro anual mais curta, pelo que terá a pior performance. Isto apesar de necessitar de menos hidrogénio em termos absolutos (111 TJ/mês) e em termos relativos, pois representa 45.30% das despesas anuais. A escala reduzida, relativamente às biorrefinarias da via ATJ no cenário 4, também dificulta a situação, devido às economias de escala. Ademais, o elevado CAPEX e uma matéria-prima mais cara também penalizam as margens, apesar das boas eficiências.

Assim, não são inesperados os valores negativos presentes na tabela 50. Com um VAL negativo de aproximadamente 74 milhões e a pior TIR de todas as biorrefinarias em ambos os cenários, a viabilidade económica da via FT é a menos competitiva. No entanto, o MSAFSP de 0.49 euros por litro é promissor para o futuro, dada a crescente atenção da opinião pública em relação às alterações climáticas e as consequências ambientais nefastas da indústria da aviação. Neste campo, o modelo tecno-económico devolve cerca de 3.44 milhares de toneladas de CO_{2e} por mês, para a via FT, o que comparado com os valores da via ATJ é interessante.

Tabela 49 - Custos e receitas da biorrefinaria FT em ambos os cenários.

Resultados económicos		FT	Unidades
Custos	CAPEX	153.07	MEUR/ano
	OPEX	30.61	
	Matéria-prima	23.00	
	Hidrogénio	44.40	
	Despesas anuais	98.02	
Receitas	SAF	34.85	
	Gasolina	43.53	
	Diesel	28.04	
	Eletricidade	0.00	
	Receitas anuais	106.42	

Tabela 50 - Parâmetros de viabilidade económica da biorrefinaria FT.

Parâmetros	FT	Unidades
Ka	9.427	
VAL	-73.917	MEUR
MSAFSP	0.490	EUR/L
TIR	3.572	%

Finalmente, a tabela 51 compara os resultados obtidos pelo modelo analítico de produção e o modelo tecno-económico para os cenários 4 e 5, de forma a apurar se o modelo tecno-económico é adequado. Nesta análise importa lembrar que os rendimentos mássicos do modelo analítico de produção (12.1, em termos práticos, e 15.1% para as vias ATJ e FT, respetivamente) foram extraídos da literatura e que não foram diretamente utilizados na elaboração do modelo tecno-económico. Tendo isso em conta, os respetivos erros relativos de 3.55 e 1.39% indicam que o modelo tecno-económico é uma boa aproximação das 2 vias de produção. Algo corroborado pelos restantes erros relativos da tabela 51. As zonas cinzentas da tabela estão vazias por serem redundantes e não há uma secção da via FT para o cenário 4 pois, uma vez mais, os dois cenários são idênticos para a via FT, em termos práticos. Optou-se pelo cenário 5 nesta tabela pois é aquele que utiliza a mesma quantidade da respetiva matéria-prima. Assim, é seguro afirmar que a metodologia heurística funcionou e que os dados mais detalhados do modelo tecno-económico são úteis. Acrescenta-se ainda que os valores de ATJ são referentes à biorrefinaria ATJ-E.

Validados os dados do modelo tecno-económico, interessa obter informação útil de modo a definir estratégias para a produção e consumo de SAF em Portugal. Primeiramente, com o hidrogénio a 4 euros por quilograma e no cenário 4, apenas a biorrefinaria ATJ-E é viável economicamente. Nessas condições seria necessário um MSAFSP de cerca de 0.43 euros por litro para viabilizar a biorrefinaria ATJ-B e um valor de 0.49 euros por litro para viabilizar a via FT. Também com o hidrogénio a 4 euros por quilograma, mas agora no cenário 5, graças às economias de escala a biorrefinaria ATJ-B já é viável, gerando um VAL considerável. No entanto, a biorrefinaria ATJ-E é, sem dúvida, a mais competitiva, com um VAL de cerca de 382 milhões de euros.

Tabela 51 - Comparação de resultados entre o modelo analítico de produção e o modelo tecno-económico.

Cenário	Via	Resultado	Massa SAF (kton/mês)	Volume SAF (ML/mês)	Emissões de GEE (kton CO _{2e} /mês)	η_{MSAF} (%)
4	ATJ	Modelo tecno-económico	7.44	9.22	11.15	12.53
		Erro relativo (%)	5.98	5.98	5.99	3.55
5	ATJ	Modelo tecno-económico	15.15	18.77	22.70	
		Erro relativo (%)	6.02	6.05	6.03	
	FT	Modelo tecno-económico	5.86	7.26	3.44	15.31
		Erro relativo (%)	3.90	3.86	3.93	1.39

Ademais, dada a importância do preço do hidrogénio para as biorrefinarias, uma breve análise de sensibilidade indica que sob o cenário 4 e as mesmas circunstâncias, um preço de 4.9 euros por quilograma de hidrogénio tornaria a biorrefinaria ATJ-E inviável economicamente, sendo necessário um MSAFSP superior aos 0.40 euros por litro. Analogamente, sob as mesmas circunstâncias e no cenário 5, um preço de 5.2 euros por quilograma de hidrogénio torna a biorrefinaria ATJ-E, a mais competitiva, inviável, mantendo-se o MSAFSP equivalente a 0.40 euros por litro. Contrariamente, caso o custo do hidrogénio desça e alcance os 3.2 euros por quilograma, a biorrefinaria FT ficaria viável em ambos os cenários.

Assumindo que o hidrogénio fica avaliado em 6.5 euros por quilograma (Tom DiChristopher, 2021), todas as biorrefinarias nos dois cenários ficam financeiramente inviáveis. Especificamente no cenário 4, as biorrefinarias ATJ-E e ATJ-B ficam caracterizadas por MSAFSP de 0.65 e 0.81 euros por quilograma, respetivamente, enquanto que no cenário 5 as mesmas biorrefinarias têm MSAFSP de 0.60 e 0.76 euros por quilograma, uma vez mais demonstrando economias de escala. Ao mesmo preço de hidrogénio, a biorrefinaria FT requer um MSAFSP de 0.81 euros por quilograma.

Concluída a análise de sensibilidade ao preço do hidrogénio, fez-se a mesma análise às matérias-primas. Sendo a biorrefinaria ATJ-E a mais competitiva entre as duas, averiguou-se a que preços de sobranes de milho ficaria a produção inviável para os dois cenários. No cenário 4 a biorrefinaria ATJ-E apresenta um VAL negativo a partir dos 62 euros por tonelada de sobranes de milho. O cenário 5 oferece mais margem de manobra, sendo o preço limite 69 euros por tonelada. Em relação à via de produção FT, um preço de 33 euros por tonelada de resíduos de eucalipto torna viável a respetiva biorrefinaria. Os MSAFSP específicos a esta análise de sensibilidade são todos idênticos: 0.40 euros por litro.

Assim, conclui-se esta secção sabendo que apenas abaixo dos 4.9 euros por quilograma de hidrogénio é que as biorrefinarias modeladas passariam a ser economicamente viáveis, caso se mantenham os preços dos produtos energéticos por elas produzidos. Abaixo dos 3.2 euros por quilograma de hidrogénio, todas as biorrefinarias modeladas são viáveis aos preços de SAF, gasolina e diesel hoje praticados. Sabe-se também que na passagem do cenário 4, para o 5, que diz respeito exclusivamente à capacidade instalada da via ATJ, deverá ser expandida a biorrefinaria inicial dos (57.99 para os 118.05 milhares de toneladas mensais de sobranes de milho), para beneficiar enormemente das economias de escala. Sabe-se também que em termos económicos a biorrefinaria ATJ-E deverá ser a escolhida em detrimento da biorrefinaria ATJ-B, casos as atuais circunstâncias se mantenham.

Importa também abordar os pontos mais débeis do modelo tecno-económico desenvolvido. A ausência, na via FT, de informação sobre excedentes de eletricidade ou não, e também a ausência de dados relativos ao consumo de água. Ainda na via FT, o gaseificador escolhido não poderá, em termos práticos, ser usado à escala para qual o modelo foi elaborado, algo explícito na tabela 10 que mostra o quão limitada é a sua capacidade. No entanto, a utilização de um gaseificador de leiteo fluidizado é até preferencial de acordo com a literatura existente, o que permitirá não só encaixar a

capacidade instalada necessária como também melhor a eficiência da gaseificação, propositadamente conservadora no modelo tecno-económico. A biorrefinaria ATJ-B também tem pontos fracos, nomeadamente na carência de dados, na respetiva base de dados, por comparação com a ATJ-E, o que acabou por provocar um erro relativo percentual grande por comparação com o rendimento mássico médio da base de dados (valor único, na realidade).

Por fim, no anexo 2 encontram-se agrupadas várias figuras relevantes ao modelo tecno-económico, como por exemplo conceptualizações esquemáticas das vias ATJ e FT, e também diagramas de Sankey dos fluxos mensais de energia para os cenários 4 e 5, para cada biorrefinaria.

4 Sugestões para a Definição de Estratégias para Produção de SAF em Portugal

Concluída, de forma positiva, a análise das condicionantes à viabilidade económica de cada uma das alternativas para a produção de SAF em Portugal, resta apenas utilizar os resultados obtidos e discutidos para fazer sugestões de estratégias para a implementação destes biocombustíveis na indústria da aviação do país. Qualquer boa estratégia terá de maximizar as oportunidades e minimizar as barreiras identificadas na secção 2.1.4. Assim, é essencial **investigar experimentalmente** as vias de produção já certificadas e consideradas, na secção 2.2.6, as mais promissoras: HEFA, **ATJ** e **FT**.

É fundamental tirar proveito da infraestrutura e conhecimento já existente na indústria nacional dos biocombustíveis, especialmente tendo em perspectiva a desejada transição para biocombustíveis avançados. Os SAF são a melhor alternativa aos regimes CELE e CORSIA, a melhor forma de acelerar a sustentabilidade da indústria da aviação civil e uma maneira adequada de valorizar recursos endógenos e promover economias circulares locais, assegurando coesão territorial e aliviando a dependência energética. Então, para otimizar os recursos disponíveis, os **cenários 4 e 5**, definidos na secção 3.2, deverão ser metas a atingir em qualquer estratégia. Sendo o cenário 4 o mínimo aceitável e o 5 uma aguardada extensão.

No entanto, dada a natureza imprevisível do desenvolvimento de biorrefinarias a larga escala, como testemunhado em toda a secção 2.3, a estratégia definida deverá conter redundâncias para prevenir falhanços totais. Por isso, é sugerida uma estratégia de 3 fases distintas.

Na **1ª fase** dá-se a criação de um grupo de trabalho, à semelhança do que é praticado por outras nações, composto por representantes de todas as partes interessadas das cadeias de produção de SAF analisadas neste trabalho. Incluindo atuais produtores de combustível a jato, fabricantes de reatores a jato, fabricantes de aeronaves, companhias aéreas, transportadores e outras instituições responsáveis pela logística e infraestrutura dedicada ao combustível a jato, produtores de matérias-primas residuais, responsáveis políticos, cientistas e gestores de aeroportos. Estabelecido o grupo de trabalho, faz-se a delimitação e desenvolvimento de estudos preliminares relativamente à tecnologia, modelos de negócio, impactos ambientais e estratégias políticas, com o objetivo de financiar, construir e divulgar o conhecimento necessário para a implementação, da forma mais eficiente possível, das próximas fases da estratégia.

Na **2ª fase** são construídas duas centrais de demonstração para as vias ATJ e FT que deverão ser próximas em distância para que possam ser testadas de forma integrada. Estas centrais de demonstração deverão ser vistas não como centrais a pequena escala, mas sim como laboratórios a grande escala, tendo o objetivo de testar várias configurações do sistema de produção de SAF.

A **3ª fase** é a implementação das biorrefinarias em função dos resultados da segunda fase, de acordo com a matriz estratégica apresentada na figura 19. Nesta matriz, os valores de 1 a 4 referem-se a demonstrações, progressivamente mais complexas, conseguidas com sucesso pelas

respetivas centrais experimentais. Para a via ATJ, 1 é a demonstração da produção de etanol a partir de biomassa residual como sobrantes de milho, 2 é a demonstração da produção de ATJ-SPK, 3 a produção de ATJ-SPK a partir de *syngas* e 4 a demonstração da produção de ATJ-SPK via isobutanol. Analogamente, para a via FT, 1 é demonstração da produção de *syngas* a partir de resíduos lignocelulósicos, 2 a demonstração de toda a cadeia de produção a partir dos mesmos resíduos, 3 é a gaseificação da lenhina dos sobrantes de milho e 4 é a demonstração de toda cadeia de produção a partir de RUB.

ATJ	4	e		Y		Z
	3		c		d	
	2	a		X		
	1					
	0			b		f
		0	1	2	3	4
		FT				

Figura 19 - Matriz estratégica da implementação de SAF.

As letras na matriz estratégica são condições de “sucesso” que permitem implementar avanços na produção de SAF em Portugal. Com uma demonstração de 2 na via ATJ, “a” indica a possibilidade de construir a 1ª biorrefinaria ATJ, neste caso ATJ-E. Por sua vez, “b” indica a possibilidade de construção da 1ª biorrefinaria FT, enquanto que “X” representa que ambas as condições para executar o cenário 4 estão satisfeitas, atingido assim o mínimo aceitável de produção de SAF em Portugal. Quanto a “c” e “d”, representam integrações nas biorrefinarias das diferentes vias, nomeadamente a fermentação de *syngas* e a gaseificação de lenhina, respetivamente. Por fim, “e” indica a possibilidade de comparar empiricamente as performances das vias ATJ-E e ATJ-B, sendo que “Y” representa a possibilidade de avançar com certezas para o cenário 5, otimizando assim a utilização dos sobrantes de milho e resíduos de eucalipto. No entanto, caso a demonstração 4 da via FT seja alcançada, “f”, o potencial nacional para a produção de SAF é expandido, resultando num possível cenário 6 (“Z”), onde há a possibilidade de utilizar RUB como matéria-prima na via FT.

Esta estratégia, por fases, promove a cooperação entre atores e minimiza riscos porque só o sucesso em cada uma das fases permitirá a passagem à próxima. O grupo de trabalho criado na 1ª fase terá de ter sucesso e grande produtividade para que a 2ª fase seja iniciada, e, por sua vez, será o sucesso da 2ª fase a definir o futuro da 3ª fase e consequentemente da produção de SAF no país.

5 Conclusões

Para conseguir definir estratégias, realistas e sustentáveis, para a produção e consumo de SAF na República Portuguesa foi necessário desenvolver uma abordagem completa e interdisciplinar, porém prática também. Primeiramente foi feita uma extensa revisão da literatura, dividida em 3 partes. A primeira delas, referente à compreensão das estratégias já existentes a nível internacional, europeu e doméstico, de modo a completar o primeiro objetivo de identificação de barreiras e oportunidades à implementação dos SAF.

A segunda parte da revisão de literatura abordou a identificação das potenciais cadeias de produção de SAF, enquanto que a segunda aprofundou o estado da arte da produção, isto permitiu adquirir informação essencial para este trabalho. Da análise do estado da arte das quatro principais famílias de produção de SAF, foi possível determinar, com base na performance ambiental e no nível de prontidão das tecnologias, as três famílias mais promissoras para serem lançadas no curto-médio prazo, algo essencial no contexto das alterações climáticas. Essas três famílias: HEFA, ATJ e FT, foram estudadas ao pormenor para mais tarde serem devidamente modeladas.

O próximo passo foi a modelação e identificação, num contexto nacional, das potenciais cadeias de valor das três famílias promissoras. Foi averiguada a capacidade instalada nacional para a produção de combustível a jato e encontrou-se uma relação direta com o consumo, sendo este último sazonal. Esta análise mês a mês é original e permite observar melhor as vantagens ambientais do consumo de SAF, tornadas óbvias nos meses em que há menos procura de combustível tradicional e consequentemente uma redução de emissões maior.

A partir da caracterização da capacidade instalada nacional e com alguns dos dados extraídos diretamente da literatura foi elaborado um modelo analítico de produção, para uma aproximação inicial aos impactos ambientais dos SAF. O objetivo era determinar qual a melhor alocação em a cada via promissora e a produção mensal de SAF adequada aos recursos disponíveis no país. Dada a competição com o biodiesel, uma barreira identificada na secção 2.1, a produção de SAF via HEFA ficou imediatamente comprometida, apesar de ser a família de conversão mais estabelecida industrialmente. Contrariamente, as vias ATJ e FT dominam em capacidades planeadas para o futuro e ambas encaixam nos recursos disponíveis no país, sobrantes de milho e resíduos de eucalipto, respetivamente.

O modelo analítico de produção aplicado a estas vias e respetivos recursos permitiu avaliar o potencial nacional para a produção de SAF, as alocações energéticas de produção e os impactos ambientais. Para além disso, permitiu também fazer uma otimização via aplicação de um problema de programação linear com múltiplas (duas) funções objetivo. Desta inovação surgiram dois cenários que minimizam cada uma das funções objetivo escolhidas (emissões de GEE e custo) e acabam por representar um intervalo entre o mínimo aceitável por decisores políticos para a produção de biocombustíveis avançados, nos quais se inserem os SAF, até o máximo para as matérias-primas em questão.

As características dos dois cenários foram essenciais para desenvolver o modelo tecno-económico. O cenário 4 declara uma produção mensal de 15.67 milhões de litros com 44.5 e 55.5% alocados em termos energéticos às vias FT e ATJ, respetivamente. O mesmo cenário introduz redução mensais de GEE entre os 7 e os 12%, com uma média de 9.09%. Já o cenário 5, mais ambicioso, produziria mensalmente 24.69 milhões de litros de SAF (com alocações de 28.3 e 71.7%, respetivamente) e reduções mensais de GEE entre 10 a 18% com o valor médio de 13.54%.

Sabendo a escala dos cenários a serem estudados, assim como as matérias-primas, uma metodologia heurística foi escolhida para criar o modelo tecno-económico, dada a escassez de informação útil. Os dados recolhidos anteriormente permitiram criar uma base de dados de rendimentos mássicos para a via ATJ utilizada para construir passo-a-passo o modelo detalhado de uma biorrefinaria ATJ, tanto de isobutanol como de etanol. A via FT, não só com menos informação, mas também mais dispersa em vários gaseificadores, foi modelada também com uma metodologia heurística, porém mais detalhada dada a especificidade da composição do *syngas*. O objetivo do modelo detalhado era averiguar os balanços de massa e energia das três biorrefinarias associadas (ATJ-E, ATJ-B e FT), assim como a sua eficiência e condicionantes à viabilidade económica. A vertente económica foi abordada uma vez mais com metodologia heurística, nomeadamente a lei das potências.

Os erros relativos entre o modelo analítico de produção e o modelo tecno-económico foram mínimos, demonstrando que a metodologia heurística permitiu desenvolver um modelo tão útil em termos de resultados como os da literatura. Do modelo tecno-económico surgiu que a biorrefinaria ATJ-E é a mais competitiva. O cálculo do MSAFSP para cada biorrefinaria é um novo aperfeiçoamento referente aos SAF. A principal discrepância com a literatura foi o peso financeiro do hidrogénio limpo, dado ter-se assumido um valor de 4 euros por kg. Desta surpresa surgiu uma breve análise de sensibilidade que oferece novas introspeções: com o hidrogénio a 5.2 euros por kg, nenhuma biorrefinaria modelada é viável, enquanto que a partir dos 3.2 euros por kg, todas seriam viáveis. Com o hidrogénio a 6.5 euros por kg, os MSAFSP variam de 0.60 até 0.81 euros por litro.

Por fim, foi sugerida uma estratégia assente numa matriz estratégica única e composta por 3 fases: de estudo, experiência e implementação de biorrefinarias. Implementação essa baseada nos cenários obtidos do modelo analítico de produção e aprofundados no modelo tecno-económico. O que acaba por sublinhar a originalidade deste estudo, ao desenvolver cenários de produção via otimização de recursos, custos e impactes ambientais, aprofundados por um modelo tecno-económico para cada biorrefinaria contida nos cenários em causa e depois utilizados para sugerir estratégias de produção e consumo de SAF.

Futuros trabalhos poderiam utilizar a metodologia deste estudo para fazer aproximações iniciais a estratégias de produção de SAF noutras locais. No contexto do nosso país, uma modelação rigorosa dos processos de cada uma das biorrefinarias aqui aproximadas e com uma análise tecno-económica específica, representaria uma mais valia. Do mesmo modo, um estudo de impactos

ambientais e uma análise de ciclo de vida às mesmas biorrefinarias seriam um grande passo em frente na sua implementação.

Referências

- Accenture (2017) *Impact of Changing Fuel Prices on the US Aviation Industry*.
- Air BP (2000) *Handbook of Products*.
- Alamia, A. (2017) 'Performance of large-scale biomass gasifiers in a biorefinery, a state-of-the-art reference'. doi: 10.1002/er.
- Alt Alto (2020) *Immingham - Alt Alto*. Available at: <https://www.altalto.com/immingham/>.
- Alves, C. M. *et al.* (2016) 'Techno-economic assessment of biorefinery technologies for aviation biofuels supply chains in Brazil', *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*. doi: 10.1002/bbb.1711.
- APA (2019) *Gestão de Óleos Alimentares Usados (OAU)*.
- APA (2020a) *APA - Instrumentos > Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSA)*. Available at: <https://apambiente.pt/index.php?ref=17&subref=1594> (Accessed: 2 April 2020).
- APA (2020b) *Instrumentos > CORSA - Compensação das Emissões de Carbono da Aviação Internacional > Calendário / Timeline*. Available at: <https://apambiente.pt/index.php?ref=17&subref=1598&sub2ref=1599> (Accessed: 9 April 2020).
- APREN (2018) *Parlamento Europeu fixa meta de 32% para as energias renováveis até 2030*. Available at: <https://www.apren.pt/pt/parlamento-europeu-fixa-meta-de-32-para-as-energias-renovaveis-ate-2030>.
- Arena, U. (2012) 'Process and technological aspects of municipal solid waste gasification . A review', *Waste Management*. Elsevier Ltd, 32(4), pp. 625–639. doi: 10.1016/j.wasman.2011.09.025.
- Asquith, J. (2020) *The Spread Of Flight Shame In Europe—Is Greta Thunberg The Reason Why?*, *Forbes*. Available at: <https://www.forbes.com/sites/jamesasquith/2020/01/13/the-spread-of-flight-shame-in-europe-is-greta-thunberg-the-reason-why/#1948346b69bd> (Accessed: 14 July 2020).
- Baxter, G., Srisaeng, P. and Wild, G. (2020) 'The Use of Aviation Biofuels as an Airport Environmental Sustainability Measure: The Case of Oslo Gardermoen Airport', 8(1), pp. 6–17. doi: 10.14311/MAD.2020.01.01.
- BBC News (2008) *Airline in first biofuel flight*. Available at: http://news.bbc.co.uk/2/hi/uk_news/7261214.stm (Accessed: 16 March 2020).
- Bureau of Transportation Statistics (2018) *Average Age of Aircraft*. Available at: <https://www.bts.gov/content/average-age-aircraft> (Accessed: 17 March 2020).
- CAAFI (2019) *CAAFI - Fuel Readiness Tools*. Available at: <http://www.caafi.org/information/fuelreadinesstools.html#> (Accessed: 14 July 2020).
- Cai, H. *et al.* (2018) 'Techno-Economic Analysis and Life-Cycle Analysis of Two Light-Duty Bioblendstocks: Isobutanol and Aromatic-Rich Hydrocarbons', *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. American Chemical Society, 6, pp. 8790–8800. doi: 10.1021/acssuschemeng.8b01152.
- CAPA - Centre for Aviation (2018) *Record global aircraft deliveries in 2017: Boeing ahead of Airbus again, but behind on order backlog*. Available at: <https://centreforaviation.com/analysis/reports/record-global-aircraft-deliveries-in-2017-boeing-ahead-of-airbus-again-but-behind-on-order-backlog-393914> (Accessed: 16 March 2020).
- CARB (2020) *Fuel Pathways | Low Carbon Fuel Standard*. Available at: https://ww3.arb.ca.gov/fuels/lcfs/fuelpathways/fuelpathways_archive.htm (Accessed: 15 April 2020).
- Castanheira, D. F. D. (2017) *Estudo de um sistema de gaseificação para cogeração – Estudo*

experimental e de aplicação, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Universidade do Porto.

Chowdhury, N. (2014) *Advances and Trends in Woody Biomass Gasification Acknowledgements*. Available at: <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/1689244997255169/Thesis.pdf>.

Deng, Y. (2011) *Ancient Chinese Inventions*. Cambridge University Press.

DGEG (2021) *Vendas mensais de derivados de petróleo, Petróleo e Derivados*. Available at: <https://www.dgeg.gov.pt/pt/estatistica/energia/petroleo-e-derivados/vendas-mensais/> (Accessed: 17 February 2021).

Diederichs, G. W. *et al.* (2016) 'Techno-economic comparison of biojet fuel production from lignocellulose, vegetable oil and sugar cane juice', *Bioresource Technology*. Elsevier Ltd, 216, pp. 331–339. doi: 10.1016/j.biortech.2016.05.090.

Doliente, S. S. *et al.* (2020) 'Bio-aviation Fuel : A Comprehensive Review and Analysis of the Supply Chain Components', 8(July), pp. 1–38. doi: 10.3389/fenrg.2020.00110.

E4Tech (2009) 'Review of Technologies for Gasification of Biomass and Wastes'.

Edwards, W., Hart, C. and Leibold, K. (2012) 'Economics of corn stover', in. doi: 10.31274/icm-180809-88.

ESFERA (2019) *Coordination of Renewable Fuel Stakeholder's Strategy in the Field of Aviation: Pathways for alternative fuels production*.

ESFERA (2020) *Coordination Of Renewable Fuel Stakeholder's Strategy In The Field Of Aviation*.

European Commission (2013) '2 million tons per year: A performing biofuels supply chain for EU aviation August 2013 Update', (August), pp. 1–37. Available at: http://ec.europa.eu/energy/technology/events/2011_05_18_biofuels_in_aviation_en.htm%5Cnhttp://ec.europa.eu/energy/renewables/biofuels/doc/20130911_a_performing_biofuels_supply_chain.pdf.

European Commission (2020) *EU Emissions Trading System (EU ETS)*. Available at: https://ec.europa.eu/clima/policies/ets_en (Accessed: 3 April 2020).

European Commission (2019a) *Renewable Energy – Recast to 2030 (RED II), EU Science Hub - European Commission*. Available at: <https://ec.europa.eu/jrc/en/jec/renewable-energy-recast-2030-red-ii> (Accessed: 16 April 2020).

European Commission (2019b) *Taxes in the Field of Aviation and their impact - Final report*. doi: 10.2832/913591.

European Environment Agency (2019a) *Greenhouse gas emission trend projections and target*. Available at: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/greenhouse-gas-emission-trend-projections> (Accessed: 18 March 2020).

European Environment Agency (2019b) *Greenhouse gas emissions from transport in Europe*. Available at: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/transport-emissions-of-greenhouse-gases/transport-emissions-of-greenhouse-gases-12> (Accessed: 18 March 2020).

FlightPath (2019a) *Sustainable Fuels for Aviation in Europe*. Brussels. Available at: <https://www.biofuelsflightpath.eu/>.

FlightPath (2019b) *Swedish proposal for a sustainable aviation fuel mandate in Sweden*. Available at: <https://www.biofuelsflightpath.eu/news/60-swedish-proposal-for-an-alternative-aviation-fuel-mandate-in-sweden>.

FlightPath (2020) *About*. Available at: <https://www.biofuelsflightpath.eu/about> (Accessed: 20 March 2020).

Fulcrum Bioenergy (2020) *Sierra BioFuels Plant*. Available at: <https://fulcrum-bioenergy.com/facilities/>.

Geleynse, S. *et al.* (2018) 'The Alcohol-to-Jet Conversion Pathway for Drop-In Biofuels : Techno-Economic Evaluation', pp. 3728–3741. doi: 10.1002/cssc.201801690.

Gray, N. *et al.* (2021) 'Decarbonising ships, planes and trucks: An analysis of suitable low-carbon fuels for the maritime, aviation and haulage sectors', *Advances in Applied Energy*. Elsevier Ltd, 1(January), p. 100008. doi: 10.1016/j.adapen.2021.100008.

Gruber, H. *et al.* (2019) 'Fischer-Tropsch products from biomass-derived syngas and renewable hydrogen', *Biomass Conversion and Biorefinery*. Biomass Conversion and Biorefinery.

Gutiérrez-Antonio, C. *et al.* (2017) 'A review on the production processes of renewable jet fuel', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier Ltd, 79(October 2016), pp. 709–729. doi: 10.1016/j.rser.2017.05.108.

Han, J., Tao, L. and Wang, M. (2017) 'Biotechnology for Biofuels Well - to - wake analysis of ethanol - to - jet and sugar - to - jet pathways', *Biotechnology for Biofuels*. BioMed Central, pp. 1–15. doi: 10.1186/s13068-017-0698-z.

Hitchcock, D. (2019) *Ready for Takeoff? Present, Past and Future*.

Hoare, P. (2013) *Whale oil to fuel whaling ships is a gruesome and surreal proposition*, *The Guardian*. Available at: <https://www.theguardian.com/environment/blog/2013/feb/11/whale-oil-fuel-ships> (Accessed: 26 March 2020).

Honeywell UOP (2016) *United Airlines Begins Regular Commercial Flights Using Renewable Jet Fuel Made From Honeywell UOP Technology*. Available at: <https://www.honeywell.com/en-us/newsroom/pressreleases/2016/03/united-airlines-begins-regular-commercial-flights-using-renewable-jet-fuel-made-from-honeywell-uop-t> (Accessed: 15 July 2020).

Huang, H. J. *et al.* (2009) 'Effect of biomass species and plant size on cellulosic ethanol: A comparative process and economic analysis', *Biomass and Bioenergy*. Elsevier Ltd, 33(2), pp. 234–246. doi: 10.1016/j.biombioe.2008.05.007.

IATA (2019) *20 Year Passenger Forecast*. Available at: <https://www.iata.org/en/publications/store/20-year-passenger-forecast/> (Accessed: 16 March 2020).

ICAO (2018) *Sustainable Aviation Fuels Guide*.

ICAO (2019a) 'An Overview of CORSIA Eligible Fuels (CEF)', in *ICAO Environmental Report 2019*, pp. 228–231.

ICAO (2019b) 'Chapter 6 Climate Change Mitigation', in *ICAO Environmental Report 2019*, pp. 207–250.

ICAO (2019c) *CORSIA Sustainability Criteria for CORSIA Eligible Fuels*. Available at: [https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Documents/ICAO document 05 - Sustainability Criteria.pdf](https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Documents/ICAO%20document%2005%20-%20Sustainability%20Criteria.pdf).

ICAO (2019d) 'Introduction to the ICAO Basket of Measures to Mitigate Climate Change', in *ICAO Environmental Report 2019*, pp. 111–115.

ICAO (2020a) *CORSIA States for Chapter 3 State Pairs*. Available at: <https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Pages/state-pairs.aspx>.

ICAO (2020b) *Strategic Objectives*. Available at: <https://www.icao.int/about-icao/Council/Pages/Strategic-Objectives.aspx> (Accessed: 2 April 2020).

ICAO (2020c) *The World of Air Transport in 2018*. Available at: <https://www.icao.int/annual-report-2018/Pages/the-world-of-air-transport-in-2018.aspx> (Accessed: 16 March 2020).

IEA (2019a) *Sustainable Development Scenario – World Energy Model – Analysis*.

IEA (2019b) *Transport biofuels – Tracking Transport*. Available at:

<https://www.iea.org/reports/tracking-transport-2019/transport-biofuels> (Accessed: 27 March 2020).

IEA (2020) *Biofuel production in 2019 compared to consumption in 2030 under the Sustainable Development Scenario – Charts – Data & Statistics*. Available at: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/biofuel-production-in-2019-compared-to-consumption-in-2030-under-the-sustainable-development-scenario> (Accessed: 31 March 2020).

Industry High-level Group (2019) *Aviation Benefits Report*.

IRENA (2017) *Biofuels for Aviation, Europe's Energy Transition - Insights for Policy Making*. doi: 10.1016/b978-0-12-809806-6.00012-2.

Isaacson, W. (2017) 'Chapter 11 - Birds and Flight', in *Leonardo da Vinci*. London: Simon & Schuster UK Ltd, pp. 181–189.

ITAKA (2016) *Initiative Towards Sustainable Kerosene for Aviation*.

Joint Organisations Data Initiative (2021) *JODI Oil Dataset, Monthly Update, Knoema*. Available at: <https://pt.knoema.com/JODIOIL2018/jodi-oil-dataset-monthly-update> (Accessed: 17 February 2021).

Jong, S. De *et al.* (2015) 'The feasibility of short-term production strategies for renewable techno-economic comparison', pp. 778–800. doi: 10.1002/bbb.

Kinder, J. and Rahmes, T. (2009) *Evaluation of Bio-Derived Synthetic Paraffinic, The Boeing Company Sustainable Biofuels Research & Technology Program*.

Klein, B. C. *et al.* (2018) 'Techno-economic and environmental assessment of renewable jet fuel production in integrated Brazilian sugarcane biorefineries', *Applied Energy*. Elsevier, 209(October 2017), pp. 290–305. doi: 10.1016/j.apenergy.2017.10.079.

Kubler, H. (1991) 'Indicators and Significance of Air Supply in the Combustion of Wood for Heat', *Wood and Fiber Science*, 23, pp. 153–164.

L. Clay, D. (2016) *Move Over AB 32, Here Comes SB 32! (and AB 197)*, *Manatt*. Available at: [https://www.manatt.com/Insights/Newsletters/Climate-Change/Move-Over-AB-32,-Here-Comes-SB-32!\(and-AB-197\)](https://www.manatt.com/Insights/Newsletters/Climate-Change/Move-Over-AB-32,-Here-Comes-SB-32!(and-AB-197)) (Accessed: 15 April 2020).

Lanzatech (2018) *Jet Fuel Derived from Ethanol Now Eligible for Commercial Flights*. Available at: <https://www.lanzatech.com/2018/04/03/jet-fuel-derived-ethanol-now-eligible-commercial-flights/> (Accessed: 19 April 2020).

Lu, X. and Herzog, H. (2015) *Biomass to Liquid Fuels Pathways : A Techno- Economic Environmental Evaluation*.

Maertens, S. *et al.* (2019) 'Options to continue the EU ETS for aviation in a CORSIA-World', *Sustainability (Switzerland)*, 11(20), pp. 1–19. doi: 10.3390/su11205703.

Matsakas, L. *et al.* (2017) 'Green conversion of municipal solid wastes into fuels and chemicals', *Electronic Journal of Biotechnology*. Elsevier España, S.L.U., 26, pp. 69–83. doi: 10.1016/j.ejbt.2017.01.004.

Mawhood, R. *et al.* (2016) 'Production pathways for renewable jet fuel: a review of commercialization status and future prospects', *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 10(4), pp. 462–484. doi: 10.1002/bbb.1644.

McKinsey & Company (2020) *Hydrogen-powered aviation*. doi: 10.2843/766989.

Neste Oil (2019) *Neste's role in sustainable aviation*. Available at: <https://www.neste.com/companies/products/aviation/neste-my-renewable-jet-fuel> (Accessed: 15 July 2020).

Neuling, U. and Kaltschmitt, M. (2015) 'Conversion routes for production of biokerosene — status and assessment', 1, pp. 367–385. doi: 10.1007/s13399-014-0154-2.

- Nwokolo, N., Mukumba, P. and Obileke, K. (2020) 'Gasification of Eucalyptus Wood Chips in a Downdraft Gasifier for Syngas Production in South Africa', *International Journal of Renewable Energy Research*, 10(2).
- Pereira Gaspar, R. M. (2016) *Impact of Alternative Fuels on the Operational and Environmental Performance of Commercial Aircraft*. Universidade de Lisboa - Instituto Superior Técnico.
- Phyllis (2021) *Phyllis2 - Glucose (C6H12O6)*. Available at: <https://phyllis.nl/Biomass/View/1181> (Accessed: 23 July 2021).
- Pinto, F. *et al.* (2017) *Plano Nacional Para a Promoção das Biorrefinarias Horizonte 2030*.
- Porcu, A. *et al.* (2019) 'Techno-Economic Analysis of a Small-Scale Biomass- to-Energy BFB Gasification-Based System'. doi: 10.3390/en12030494.
- Red Rock Biofuels (2020) *Red Rock Biofuels - Lakeview Site*. Available at: <https://www.redrockbio.com/lakeview-site.html>.
- Renewable Fuels Association (2020) *Annual Ethanol Production*. Available at: <https://ethanolrfa.org/statistics/annual-ethanol-production/> (Accessed: 20 March 2020).
- República Portuguesa (2019a) *Plano Nacional de Energia e Clima 2021-2030*.
- República Portuguesa (2019b) *Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050*. Available at: <https://descarbonizar2050.pt/>.
- Roussos, A. *et al.* (2019) 'A Feasibility Study of Cellulosic Isobutanol Production — Process Simulation and Economic Analysis', *Processes*.
- Ryan, C. (2019) *An Overview Of Gevo's Biobased Isobutanol*.
- Shahabuddin, M. *et al.* (2020) 'A review on the production of renewable aviation fuels from the gasification of biomass and residual wastes', *Bioresource Technology*. Elsevier, 312(March), p. 123596. doi: 10.1016/j.biortech.2020.123596.
- Sikarwar, V. S. *et al.* (2017) 'Progress in biofuel production from gasification', *Progress in Energy and Combustion Science*, 61, pp. 189–248. doi: 10.1016/j.pecs.2017.04.001.
- Smithsonian National Air and Space Museum (2020) *The Wright Brothers*. Available at: <https://airandspace.si.edu/exhibitions/wright-brothers/online/> (Accessed: 16 March 2020).
- Straathof, A. J. J. (2014) 'Transformation of Biomass into Commodity Chemicals Using Enzymes or Cells', *2014 Chemicals from Coal, Alkynes, and Biofuels*.
- Sustainable Aviation (2020) *Sustainable Aviation Fuels Road-Map*.
- Tao, L. *et al.* (2014) 'Techno-economic analysis and life-cycle assessment of cellulosic isobutanol and comparison with cellulosic ethanol and n-butanol', pp. 30–48. doi: 10.1002/bbb.
- Tom DiChristopher (2021) *Experts explain why green hydrogen costs have fallen and will keep falling*, *S&P Global*. Available at: <https://www.spglobal.com/marketintelligence/en/news-insights/latest-news-headlines/experts-explain-why-green-hydrogen-costs-have-fallen-and-will-keep-falling-63037203com> (Accessed: 30 July 2021).
- Torres, J. (2014) *Impact of Alternative Fuels Present in Airports on Aircraft Rescue and Firefighting Response*.
- Tower, W. (1907) 'Imports of Whale Products', in *A History of the American Whale Fishery*. Philadelphia: University of Pennsylvania, p. 126.
- Trindade, W. R. da S. and Santos, R. G. dos (2017) 'Review on the characteristics of butanol, its production and use as fuel in internal combustion engines', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier, 69(November 2016), pp. 642–651. doi: 10.1016/j.rser.2016.11.213.

Tsagkari, M. *et al.* (2016) 'Early-Stage Capital Cost Estimation of Biorefinery Processes: A Comparative Study of Heuristic Techniques', *ChemSusChem*, 9(17), pp. 2284–2297. doi: 10.1002/cssc.201600309.

Turns, S. R. (2012) *An Introduction to Combustion: Concepts and Applications*. Third. New York: McGraw-Hill.

US EPA (2017) *Overview for Renewable Fuel Standard*. Available at: <https://www.epa.gov/renewable-fuel-standard-program/overview-renewable-fuel-standard> (Accessed: 15 April 2020).

Vásquez, M. C., Silva, E. E. and Castillo, E. F. (2017) 'Hydrotreatment of vegetable oils: A review of the technologies and its developments for jet biofuel production', *Biomass and Bioenergy*, 105, pp. 197–206. doi: 10.1016/j.biombioe.2017.07.008.

Wang, W. *et al.* (2016) *Review of Biojet Fuel Conversion Technologies*.

Wojcieszek, M. *et al.* (2021) 'Performance of anisole and isobutanol as gasoline bio-blendstocks for spark ignition engines', *Sustainability (Switzerland)*, 13(16), pp. 1–19. doi: 10.3390/su13168729.

Zschocke, A. and Scheuermann, S. (2012) *High Biofuel Blends in Aviation (HBBA)*.

Anexos

Anexo 1

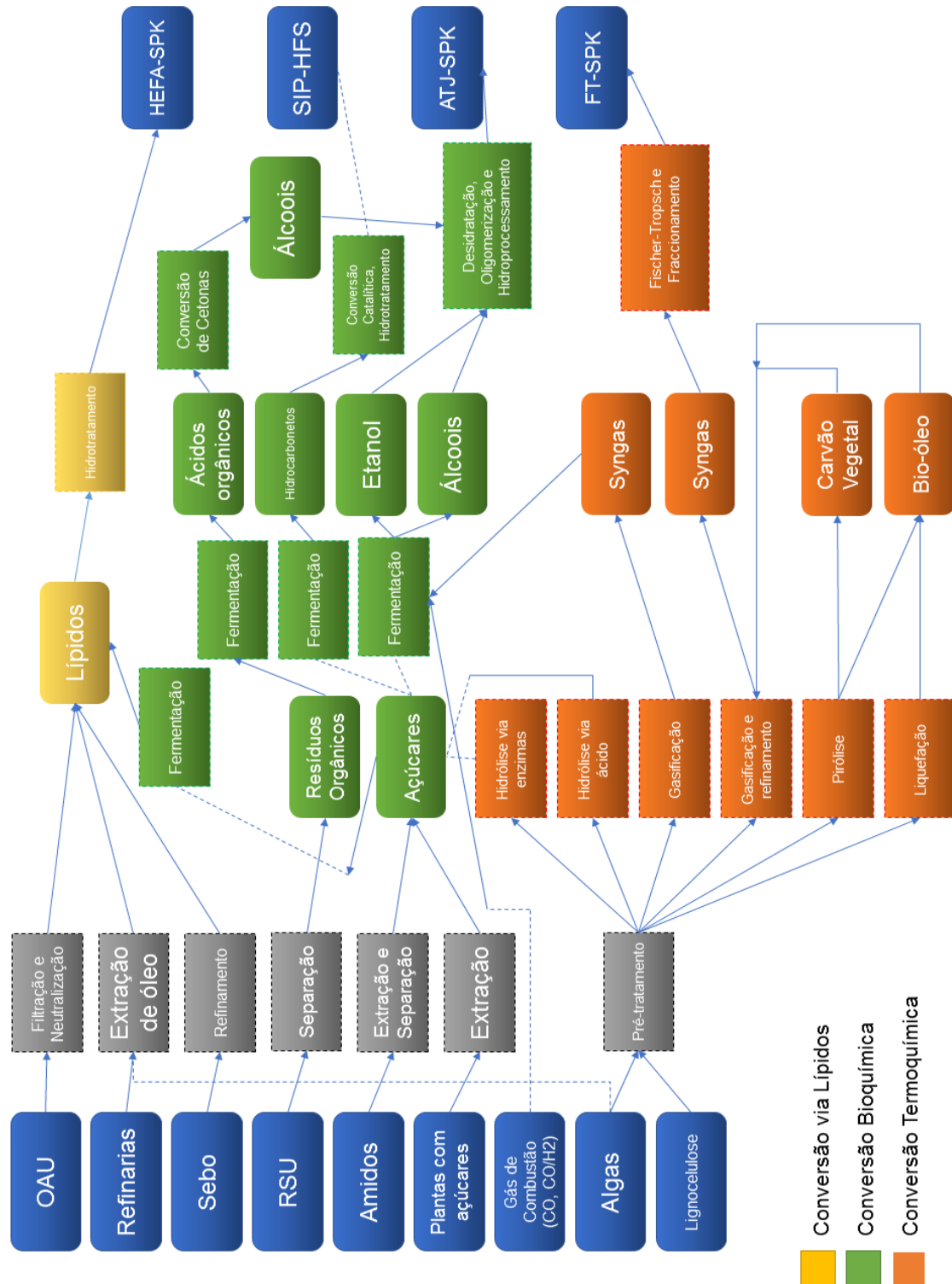


Figura Anexada 1 - Vias de conversão certificadas para biocombustíveis (adaptado) (Boeing et al., 2013).

Anexo 2

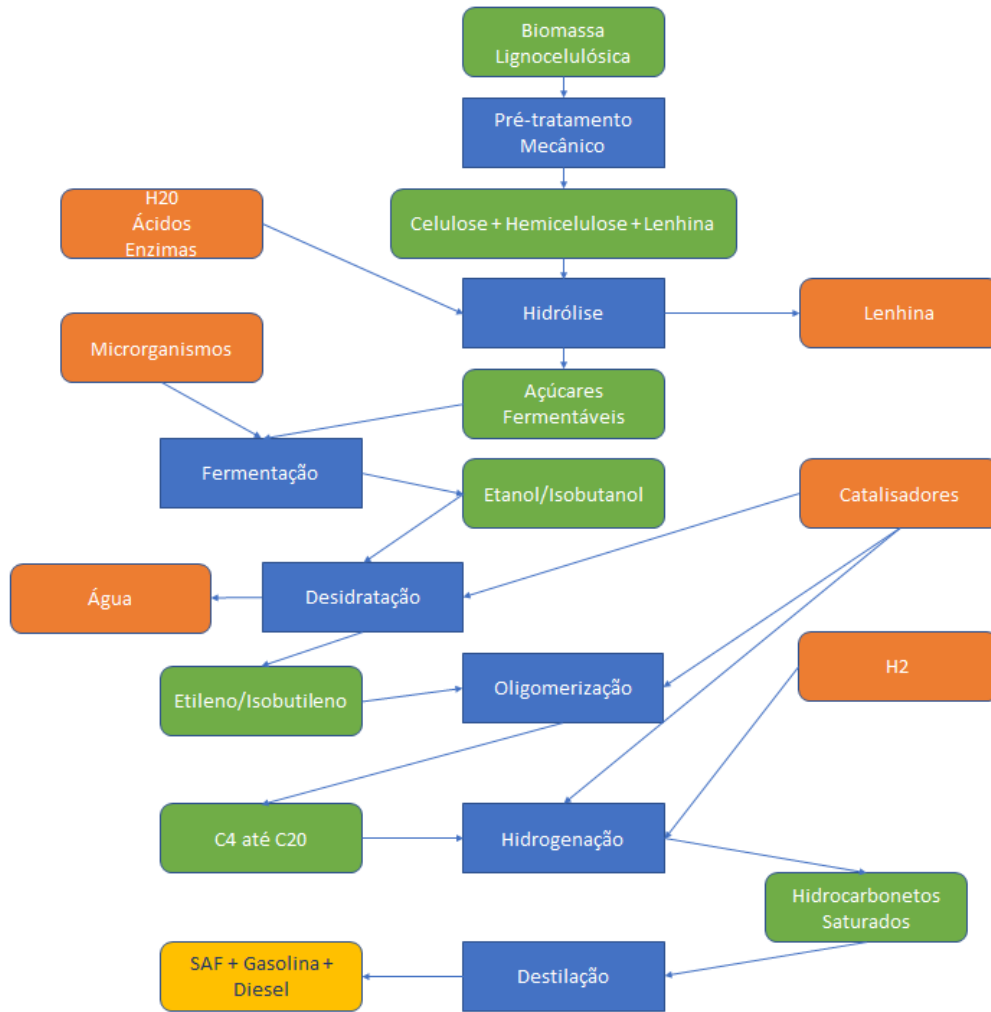


Figura Anexada 2 - Conceptualização esquemática da via de produção ATJ, tanto para etanol como para isobutanol.

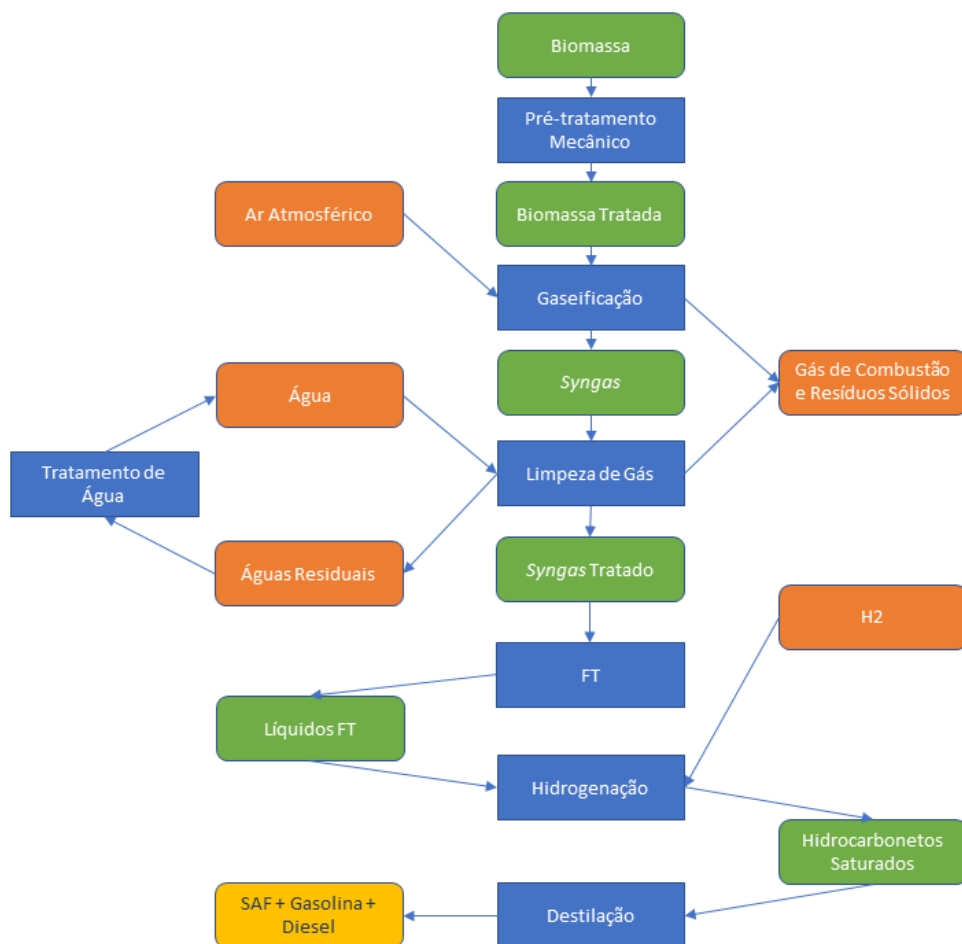


Figura Anexada 3 - Conceptualização esquemática da via de produção FT.

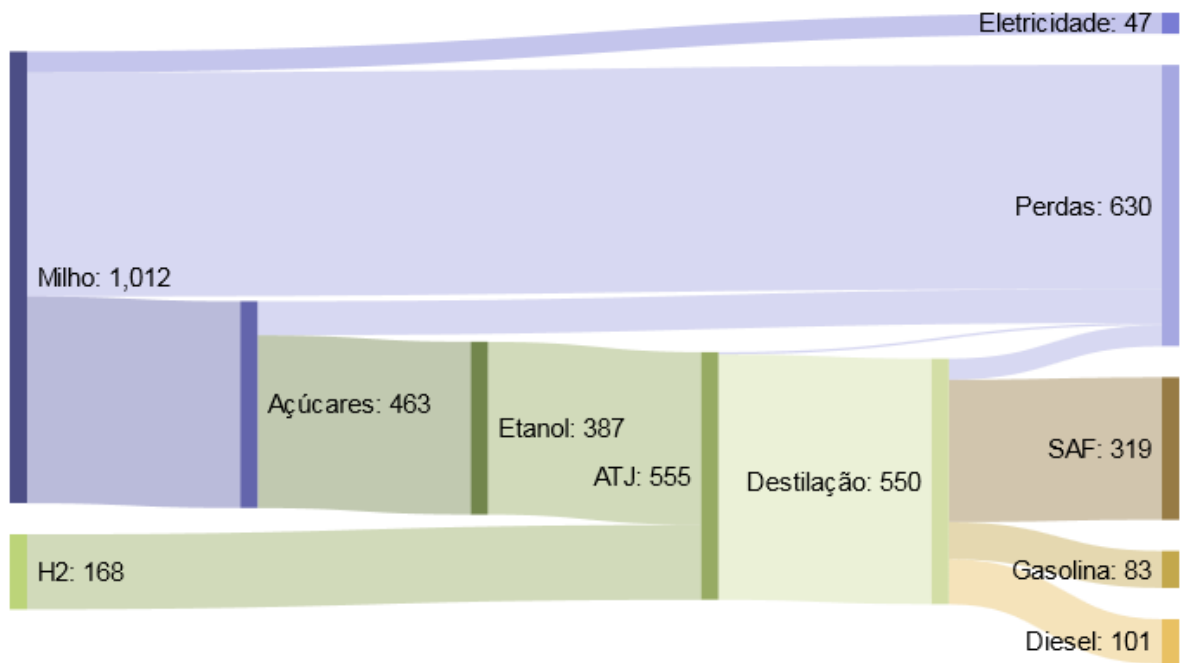


Figura Anexada 4 - Diagrama de Sankey dos fluxos mensais de energia na biorrefinaria ATJ-E, cenário 4 (TJ/mês).

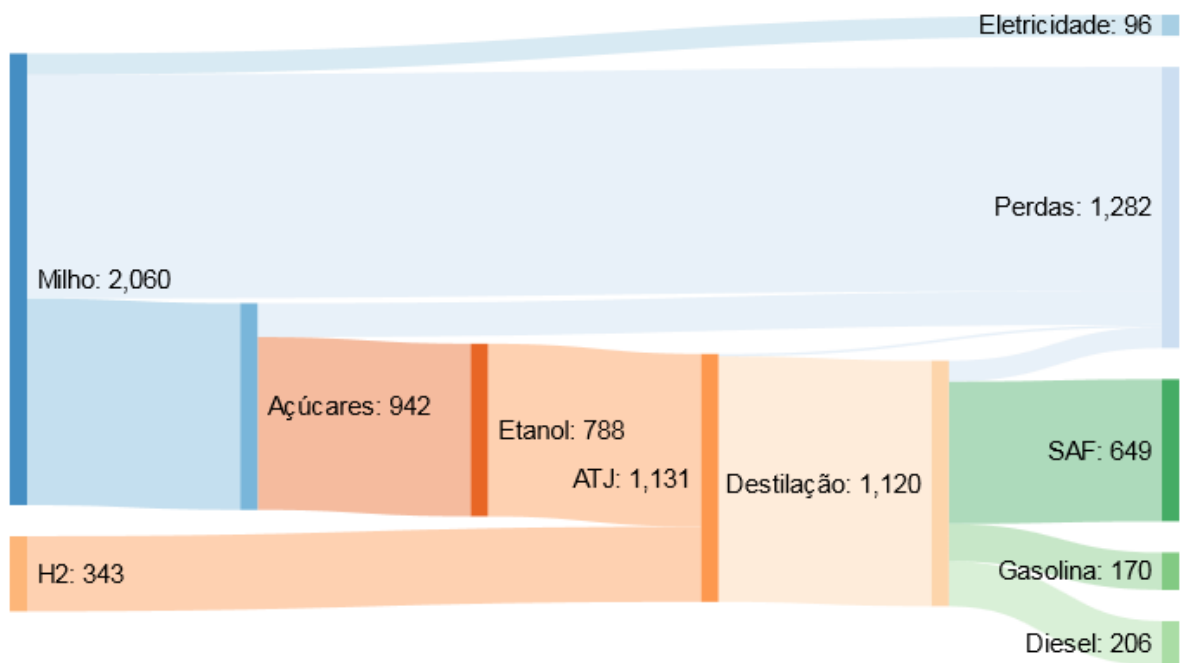


Figura Anexada 5 - Diagrama de Sankey dos fluxos mensais de energia na biorrefinaria ATJ-E, cenário 5 (TJ/mês).

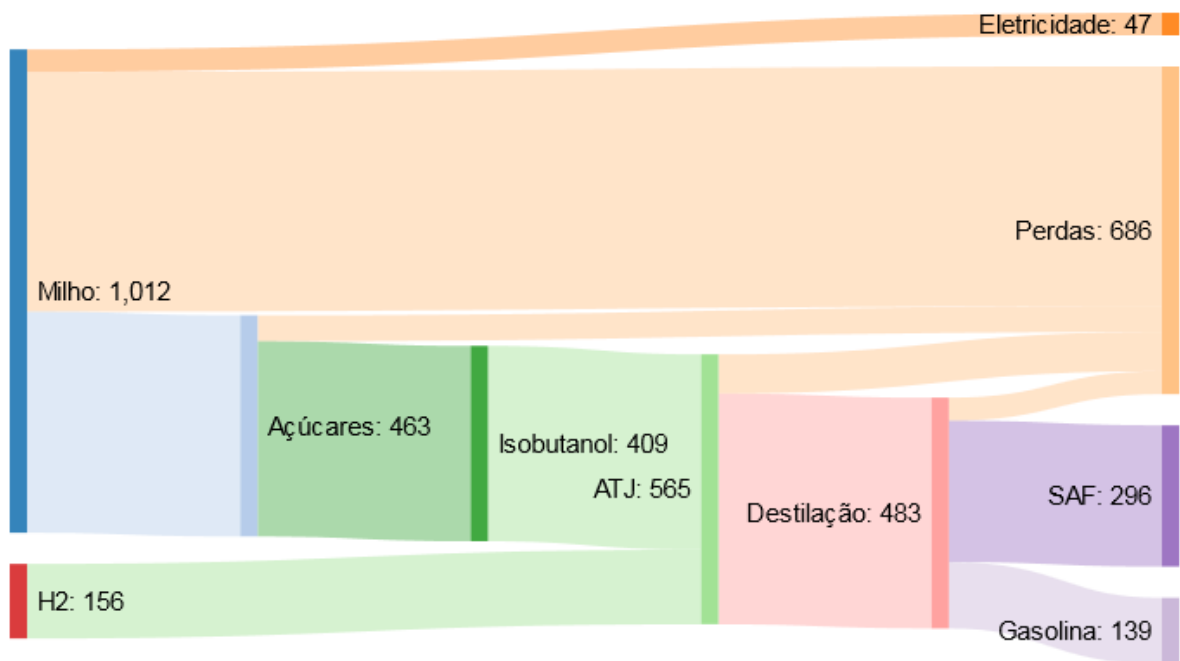


Figura Anexada 6 – Diagrama de Sankey dos fluxos mensais de energia na biorrefinaria ATJ-B, cenário 4 (TJ /mês).

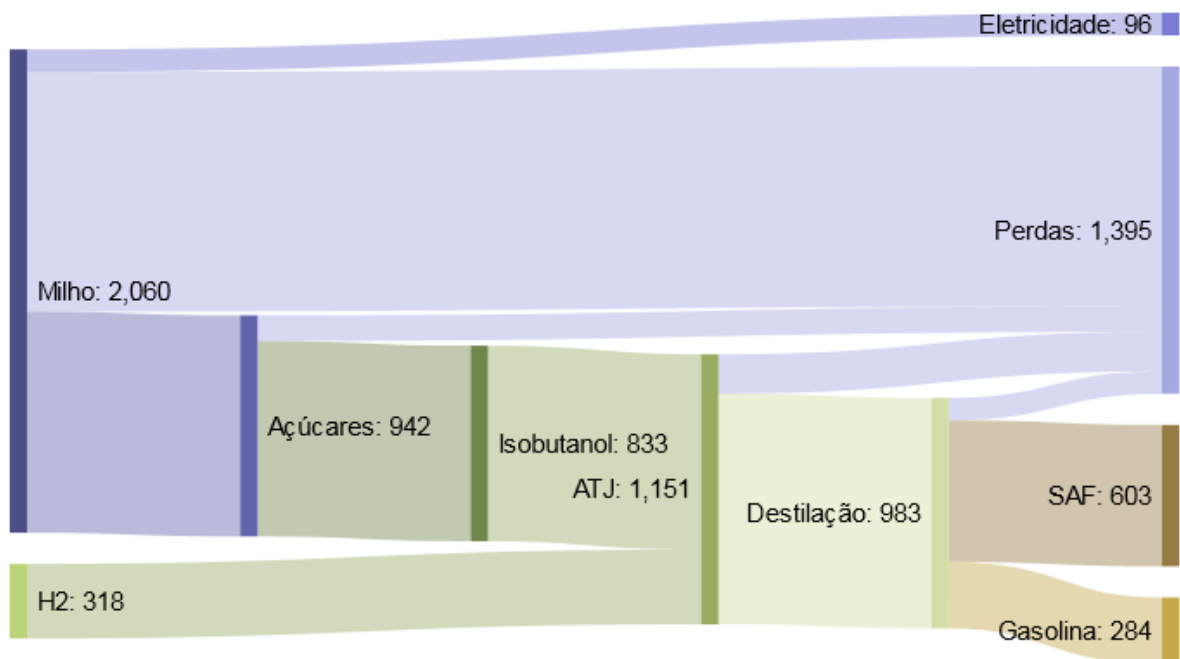


Figura Anexada 7 - Diagrama de Sankey dos fluxos mensais de energia na biorrefinaria ATJ-B, cenário 5 (TJ /mês).

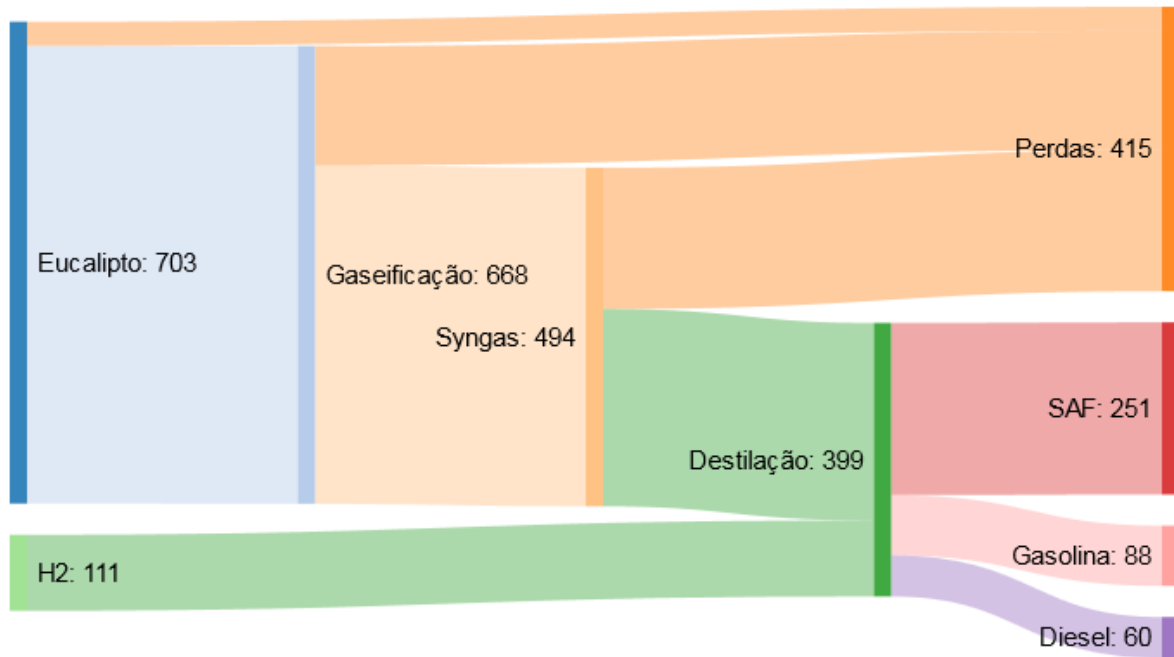


Figura Anexada 8 - Diagrama de Sankey dos fluxos mensais de energia na biorrefinaria FT, cenários 4 e 5 (TJ /mês).