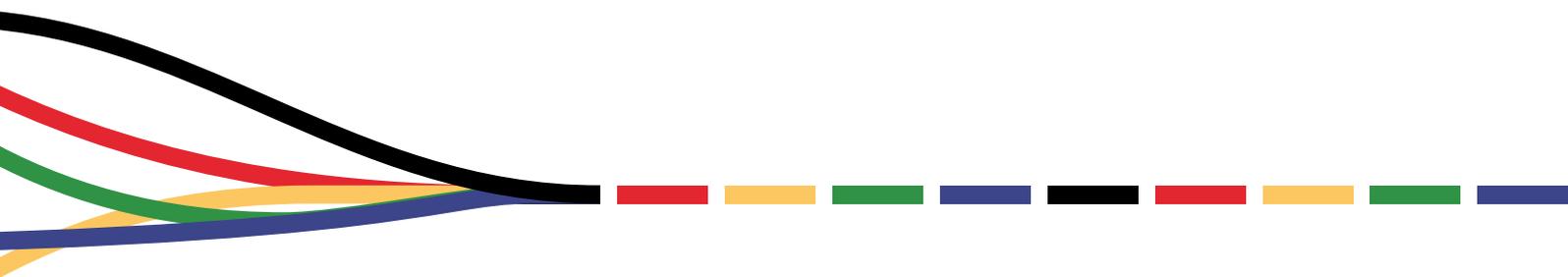


Desenvolvimento dos Eletrocombustíveis de Aviação: Dinâmica Tecnológica e Desafios Regulatórios

Relatório Final 2019
Grupo de Economia da Energia, IE/UFRJ



ProQR

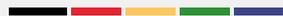
COMBUSTÍVEIS ALTERNATIVOS
SEM IMPACTOS CLIMÁTICOS



Todas as indicações, dados e resultados deste estudo foram compilados e cuidadosamente revisados pelos(as) autores(as). Apesar disso, podem ocorrer erros com relação ao conteúdo. Dessa forma, nem a GIZ nem os(as) autores(as) podem ser responsabilizados(os) por qualquer reivindicação, perda ou prejuízo, direto ou indireto, resultante do uso ou da confiança depositada sobre as informações contidas neste estudo que sejam, direta ou indiretamente, resultante dos erros, imprecisões ou omissões de informações.

As ideias e opiniões expressas nesta publicação são dos(as) autores(as) e não refletem necessariamente a posição do Ministério do Meio Ambiente, Proteção da Natureza e Segurança Nuclear (BMU), ou da Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH.

A duplicação ou reprodução do todo ou de partes do estudo (incluindo a transferência de dados para sistemas de armazenamento de mídia) e distribuição para fins não comerciais são permitidas, desde que a GIZ seja citada como fonte da informação. Para outros usos comerciais, incluindo duplicação, reprodução ou distribuição do todo ou de partes desta publicação, é preciso de autorização escrita da GIZ.



Publicado por

ProQR – Combustíveis Alternativos sem Impactos Climáticos
Cooperação Técnica Brasil-Alemanha para o Desenvolvimento Sustentável

Autores

Helder Queiroz Pinto Junior
José Vitor Bomtempo
Gustavo Alves Soares
Maria Eduarda Kreisler

Revisão técnica

Torsten Schwab (GIZ), Marcos de Oliveira Costa (GIZ)

Revisão de texto

Ana Terra Mejia Munhoz

Projeto gráfico e diagramação

Barbara Miranda
Felipe Schelb Ávila

Direção do ProQR

Eduardo Soriano Lousada (MCTIC)
Torsten Schwab (GIZ)

Execução do ProQR

| | |
|--------------------------|--------------------------|
| MCTIC | GIZ |
| Rafael Silva Menezes | Marcos de Oliveira Costa |
| Leonardo Jordão da Silva | Viola Rebekka Kammertöns |
| Gustavo de Lima Ramos | Bianca Lemos Lessa |
| | Heloísa Helena Bredemann |

Julho 2019



Contatos

Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações
Coordenação-Geral de Estratégias e Negócios
Departamento de Tecnologias Estruturantes
Secretaria de Empreendedorismo e Inovação
Esplanada dos Ministérios - Bloco E – Sala 346
70.067-900, Brasília-DF, Brasil
+55 61 2033-7817

Deutsche Gesellschaft für Internationale
Zusammenarbeit (GIZ) GmbH
SCN Quadra 1 Bloco C Sala 1401 - 14º andar
Ed. Brasília Trade Center
70711-902 Brasília-DF, Brasil
+55 61 2101-2170

Este estudo foi elaborado no âmbito do Projeto Combustíveis Alternativos sem Impactos Climáticos (ProQR), realizado por meio da Cooperação Técnica Brasil-Alemanha para o Desenvolvimento Sustentável, em parceria com o Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC) e por meio da Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH. Este projeto é parte da Iniciativa Internacional para o Clima (IKI), apoiada pelo Ministério do Meio Ambiente, Proteção da Natureza e Segurança Nuclear (BMU), com base em decisão do Parlamento alemão.

O Projeto ProQR tem o objetivo de criar um modelo de referência internacional para combustíveis alternativos sem impactos ambientais, para transporte aéreo e setores sem potencial de eletromobilidade.

Sumário

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Introdução | 7 |
| 2 | Descentralização produtiva: novo <i>driver</i> no processo de transformação energética | 9 |
| 2.1 | Vetor estrutural: descentralização e fragmentação da produção e demanda de energia | 9 |
| 2.2 | Vetor institucional: mecanismos de coordenação e regulação difusa | 13 |
| 3 | Dinâmica de desenvolvimento de novos combustíveis | 15 |
| 3.1 | A nova dinâmica de desenvolvimento de combustíveis | 16 |
| 3.2 | Matérias-primas, tecnologias, produtos e modelos de negócio na nova dinâmica de desenvolvimento de combustíveis | 18 |
| 3.2.1 | Matérias-primas | 19 |
| 3.2.2 | Tecnologias | 19 |
| 3.2.3 | Produtos | 20 |
| 3.3 | A produção de eletrocombustíveis | 22 |
| 4 | Arcabouço legal e regulatório e diretrizes de políticas: etapas para a regulamentação de eletrocombustíveis renováveis | 24 |
| 4.1 | Certificação de novos SAF | 25 |
| 4.2 | Regulação dos combustíveis de aviação no Brasil | 27 |
| 4.3 | Cadeia dos combustíveis alternativos de aviação no Brasil | 29 |
| 4.4 | Os eletrocombustíveis de aviação e os desafios regulatórios | 31 |
| 5 | Considerações finais | 35 |
| | Referências | 37 |

Lista de figuras*

| | |
|---|----|
| Figura 1. Condicionantes tecnológicas, políticas, econômicas e regulatórias | 9 |
| Figura 2. Dimensões e sentidos do processo de transição | 10 |
| Figura 3. Sentidos da transição e descentralização das fontes renováveis no setor elétrico | 11 |
| Figura 4. Sentidos da transição e descentralização dos combustíveis de aviação sustentáveis | 12 |
| Figura 5. Ambiente de regulação difusa | 14 |
| Figura 6. Os novos combustíveis: dimensões-chave em coevolução | 16 |
| Figura 7. Rotas de produção de SAF aprovadas pela ASTM | 25 |
| Figura 8. Processo de certificação de um novo SAF pela ASTM | 26 |
| Figura 9. Fuel readiness level | 27 |
| Figura 10. Cadeia de distribuição do QAV | 28 |
| Figura 11. Cadeia de distribuição de SAF | 30 |
| Figura 12. Produção do eletrocombustível renovável | 31 |

Lista de quadros

| | |
|--|----|
| Quadro 1. Estágios de maturidade tecnológica dos biocombustíveis | 21 |
| Quadro 2. Evolução dos biocombustíveis. | 22 |

*As figuras são adaptadas das fontes bibliográficas

Lista de siglas

| | |
|-----------------|--|
| ANAC | Agência Nacional de Aviação Civil |
| ANP | Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis |
| ARPA-E | Advanced Research Projects Agency-Energy |
| ASTM | American Society for Testing and Materials |
| ATJ | Alcohol to Jet |
| CAAFI | Commercial Aviation Alternative Fuels Initiative |
| CNPE | Conselho Nacional de Política Energética |
| DOE | Department of Energy |
| EPA | Environmental Protection Agency |
| FRL | Fuel Readiness Level |
| FT | Fischer-Tropsch |
| FT-SPK | Fischer-Tropsch Synthetic Paraffinic Kerosene |
| FT-SPK/A | Fischer-Tropsch Synthetic Paraffinic Kerosene with aromatics |
| HEFA | Hydro Processed Esters and Fatty Acids |
| HVO | Hydrotreated Vegetable Oil |
| ICAO | International Civil Aviation Organization |
| IEA | International Energy Agency |
| IS | Instrução Suplementar |
| JETA | Jet Fuel |
| QAVA-1 | Querosene de Aviação de Uso Civil |
| QAVB-X | Querosene de Aviação com x% de Mistura de SAF |
| SAF | Sustainable Aviation Fuel |
| SIP | Sugars to Synthetic Isoparaffins |
| TRL | Technology Readiness Level |

1 Introdução

A necessidade de conciliação entre os objetivos de segurança energética e redução de emissões de gases de efeito estufa constitui o ponto focal dos debates atuais sobre a política energética.

O processo de transformação em curso do setor de energia, caracterizado por muitos como “transição energética”, tem permitido ampliar o leque de inovação tecnológica de processos, equipamentos e novos combustíveis.

Desse modo, as políticas energéticas em diferentes países e as estratégias das empresas de energia estão sendo progressivamente reorientadas a fim de atingir, no longo prazo, padrões de produção e uso de energia que levem em consideração estas novas condições de contorno do setor de energia. O componente tecnológico e, em particular, o binômio tecnologia-energia surgem como principal vetor deste processo de transição energética.

Porém, tal processo é ainda recheado de incertezas. Tal como menciona Helm (2016, p. 199), “it is impossible to know in advance what technologies will be successful. It is in the nature of technical progress that there will be surprises. If we had the knowledge to predict, we would have the technologies already”.

Na sua fase inicial, a preocupação primordial das políticas visando acelerar o processo de transição energética era estabelecer fontes renováveis como opções viáveis do ponto de vista técnico, econômico e ambiental. Hoje, a situação é diferente: as energias renováveis estão se difundindo rapidamente em muitos países, gerando grandes mudanças para as tecnologias, organizações e infraestruturas (Markard, 2018).

Nesta nova fase da transição energética, observa-se não apenas uma aceleração da dinâmica de transição anterior, mas também novos fenômenos. Estes incluem uma complexa interação de múltiplas tecnologias, a mudança e o surgimento de novos modelos de negócio e a revisão dos instrumentos de políticas setoriais e de regulação.

O BP Energy Technology Outlook (2018) observa que o processo de transição continuará sendo marcado por: i. abundância de recursos energéticos; ii. entrada de renováveis na geração de energia elétrica; e iii. necessidade de integração das tecnologias digitais. Por outro lado, o mesmo documento revela que ainda há grande expectativa com relação ao desempenho, em matéria de redução de custos, da geração eólica e solar, bem como do armazenamento de energia.

Esse processo de transição energética se caracteriza por dois fatores complementares:

- i. Uma tendência de aumento da eletrificação em diferentes usos e setores da economia que, associada aos esforços tecnológicos conjugados da energia distribuída e do armazenamento de energia, conduz a transformações no perfil da demanda de eletricidade. Tal tendência tem proporcionado uma descentralização e fragmentação da oferta e da demanda, como será visto adiante.

- ii. Uma proativa participação dos governos na promoção de medidas para alcançar os objetivos da economia de baixo carbono. Assim, além da busca de redução de custos e de competitividade de novas fontes de energia e de novos combustíveis, o processo de transformação em curso poderia ser caracterizado como top down, dado o comprometimento simultâneo de diferentes países com os compromissos firmados no Acordo de Paris, em 2015. Nesse sentido, medidas regulatórias e instrumentos de política energética (fiscal, preços relativos, projetos de pesquisa, desenvolvimento e inovação) podem ser acionados visando acelerar os processos de transformação em curso no setor energético.

O setor de transporte não está alheio aos impactos destas tendências. No caso do transporte automotivo, muito embora não seja possível intensificar a velocidade de penetração de veículos elétricos, nem tampouco seu papel na mudança estrutural da frota de veículos com motores a combustão, a comercialização e os incentivos governamentais têm sido crescentes. No setor de transporte aéreo, porém, as alternativas de eletrificação ditas viáveis a curto e médio prazo ainda parecem distantes.

Estão em curso a busca e o processo de inovação para o desenvolvimento de novos combustíveis que possam substituir, em particular, o querosene e a gasolina de aviação. Tal como reconhece o BP Energy Technology Outlook (2018), “planes and ships are less well suited to electrification, but are also set to see changes in the types of fuel they use”. Ademais, a indústria de aviação está igualmente comprometida com a redução das emissões de gases de efeito estufa. Tal comprometimento já orienta uma série de iniciativas, principalmente no segmento de combustíveis sustentáveis de aviação (SAF, do termo inglês sustainable aviation fuels). Até o fim de 2017, mais de 100.000 voos comerciais foram realizados usando misturas de SAF.

Este relatório examina as questões-chave relacionadas com o desenvolvimento de SAF, com ênfase nos denominados eletrocombustíveis de aviação.¹ Para tal, apresenta, na seção 2, os principais drivers da transformação em curso no setor de energia. Não obstante o leque de opções ser variável de um país a outro, é possível identificar a ampliação de soluções que apontam para a importância de um vetor estrutural de transformação relacionado com as alternativas descentralizadas de produção e uso de energia. A esse vetor, associa-se um vetor institucional/regulatório, que exige novas formas de elaboração de políticas setoriais e de regulação. A seção 3 discute a dinâmica tecnológica do desenvolvimento de novos combustíveis analisando dimensões-chave e condicionantes técnicas, tais como matérias-primas, tecnologias, produtos e equipamentos.

A seção 4 apresenta e discute as principais etapas do processo de certificação internacional de combustíveis de aviação, bem como alguns aspectos do quadro regulatório no Brasil. A última seção aponta, ainda que preliminarmente, as principais conclusões.

¹ Em inglês, o eletrocombustível de aviação é conhecido como *power to liquid jet fuel*.

2 Descentralização produtiva: novo driver no processo de transformação energética

A transformação energética em curso das condições de produção e demanda de energia requer a construção de instrumentos de políticas e regulatórios que conduzam a processos de convergência tecnológica, econômica e institucional. Neste sentido, a transição energética pode ser interpretada justamente como a construção dessa convergência, envolvendo o reconhecimento, a gestão e a redução do trade-off “mudança climática & segurança energética”.

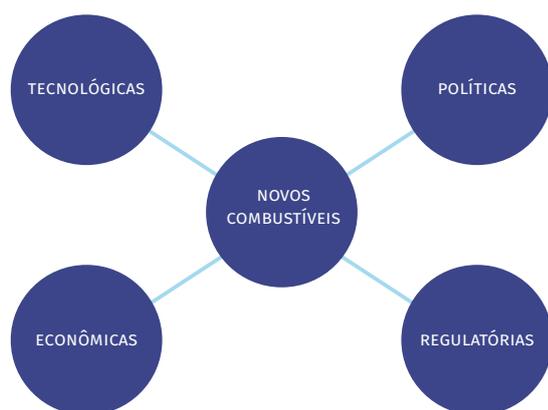


Figura 1. Condicionantes tecnológicas, políticas, econômicas e regulatórias. Fonte: elaboração própria.

Nesta perspectiva, o desenvolvimento de novos combustíveis é tributário de um conjunto de condicionantes tecnológicas, econômicas, políticas e regulatórias (Figura 1).

Assim, segundo Pinto Junior et al. (2016), a transição de uma economia baseada no uso intensivo dos combustíveis fósseis para uma economia sustentada por combustíveis renováveis é um processo estruturado pela maneira que se reconhece, se administra e se reduz esse trade-off. Isso implica a:

- i. Revisão das diretrizes e dos instrumentos de política setorial e regulação.
- ii. Reorientação e/ou adoção de novos comportamentos estratégicos das empresas produtoras de energia, que devem ser adequados aos novos perfis de demanda.

Tal processo de mudança está associado a dois vetores de transformação: i. vetor estrutural, mencionado acima, decorrente da tendência de descentralização da produção e de fragmentação da demanda e ii. vetor institucional, associado ao conceito de regulação difusa, comportando um conjunto de instituições responsáveis por distintos níveis hierárquicos de regulação (multi-level regulation).

Esses vetores de transformação e suas implicações para o surgimento de novos combustíveis de aviação são examinados a seguir.

2.1 Vetor estrutural: descentralização e fragmentação da produção e demanda de energia

A literatura tem destacado a importância de interpretar as transições em curso a partir de uma visão que possa conciliar as abordagens conceituais e teóricas sobre, de um lado, a evolução de sistemas sociotécnicos; e, de outro, o papel da interação entre políticas setoriais (policy mix perspective). Neste relatório, o termo policy mix refere-se a uma combinação de instrumentos de política e sua interação.

Essa perspectiva é particularmente útil para o exame das transformações em curso no setor de energia. Uma ilustração é oferecida por Lindberg, Markard e Andersen (2018), que examinaram a questão das mudanças estruturais do setor elétrico na União Europeia à luz da visão que integra os conceitos de sustainability transitions e policy mixes. A abordagem dos autores pode ser sintetizada em duas figuras (Figuras 2 e 3). Lindberg, Markard e Andersen (2018) destacam que o grau de ruptura e o grau de sustentabilidade são suficientemente independentes para distinguir caminhos de transição.

Na Figura 2, partindo de um sistema socio-técnico considerado não sustentável (status quo), projetam-se mudanças em relação às práticas atuais que podem ser mais ou menos sustentáveis e mais ou menos disruptivas para os atores. O caminho que leva ao quadrante superior esquerdo representa uma transição de sustentabilidade menos disruptiva, pois aponta para a manutenção de modelos de negócio. Já o sentido que leva ao quadrante superior direito gera grandes melhorias de sustentabilidade, com mudanças consideráveis na configuração do sistema sociotécnico, colocando em xeque o papel das empresas incumbentes e dos operadores históricos. Já o caminho para o quadrante inferior direito seria uma transição caracterizada por uma mudança disruptiva sem grande melhoria em termos de sustentabilidade.

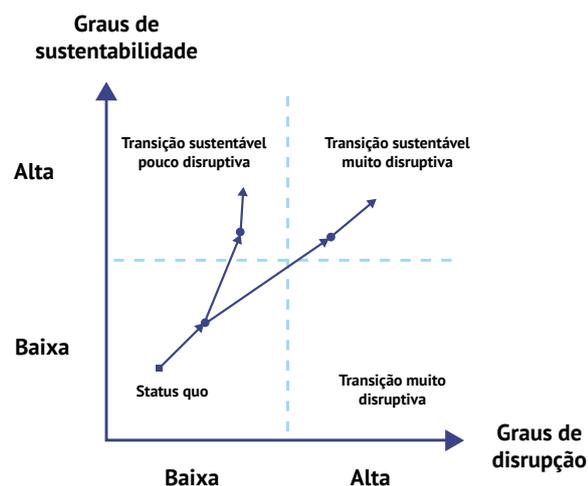


Figura 2. Dimensões e sentidos do processo de transição. Fonte: adaptação de Lindberg, Markard e Andersen (2018).

A fim de avaliar o potencial disruptivo do processo de transição no setor elétrico, os autores focaram na análise das políticas e preferências dos atores com relação às tecnologias descentralizadas na produção de eletricidade, redes e operações do sistema. Dado que o sistema de eletricidade foi organizado de forma centralizada, com forte integração vertical e presença de monopólios naturais de transmissão e distribuição, a tendência à descentralização poderia ser caracterizada aqui como um vetor estrutural de transformação disruptiva para o setor elétrico.

Neste sentido, a descentralização do sistema elétrico não apenas implica novas maneiras de coordenar a operação, que permitem o equilíbrio instantâneo entre oferta e demanda decorrente da não estocabilidade da eletricidade, mas também modifica a lógica e os critérios que favoreceram até hoje, do ponto de vista econômico, a escolha de projetos de grande escala.

Isto posto, Lindberg, Markard e Andersen (2018) distinguem quatro opções de evolução e transformação para o setor elétrico (Figura 3) em função da velocidade de penetração das fontes renováveis (RES, do termo inglês renewable energy sources). O quadrante business-as-usual implica pouca ou nenhuma implantação adicional de renováveis. Já o Centralizado RES representa uma mudança importante ao longo da dimensão de sustentabilidade, sem grande interrupção para os atores estabelecidos. Tal configuração seria baseada em renováveis de grande escala, como a eólica e a expansão das redes de transmissão para equilibrar a oferta e a demanda variáveis.

O quadrante Descentralizado RES aponta para energias renováveis distribuídas em pequena escala, com forte penetração de energia solar fotovoltaica no setor residencial e transformação dos consumidores em prosumers (que vendem excedentes de eletricidade para a rede elétrica). Tal configuração altera a estrutura industrial do setor elétrico, com a incorporação de novas tecnologias e o surgimento de novos modelos de negócio. Por fim, o quadrante Autoprodução Descentralizada seria, segundo os autores, similarmente disruptivo, porém menos sustentável devido à presença de autoprodutores com centrais elétricas baseadas em combustíveis fósseis.

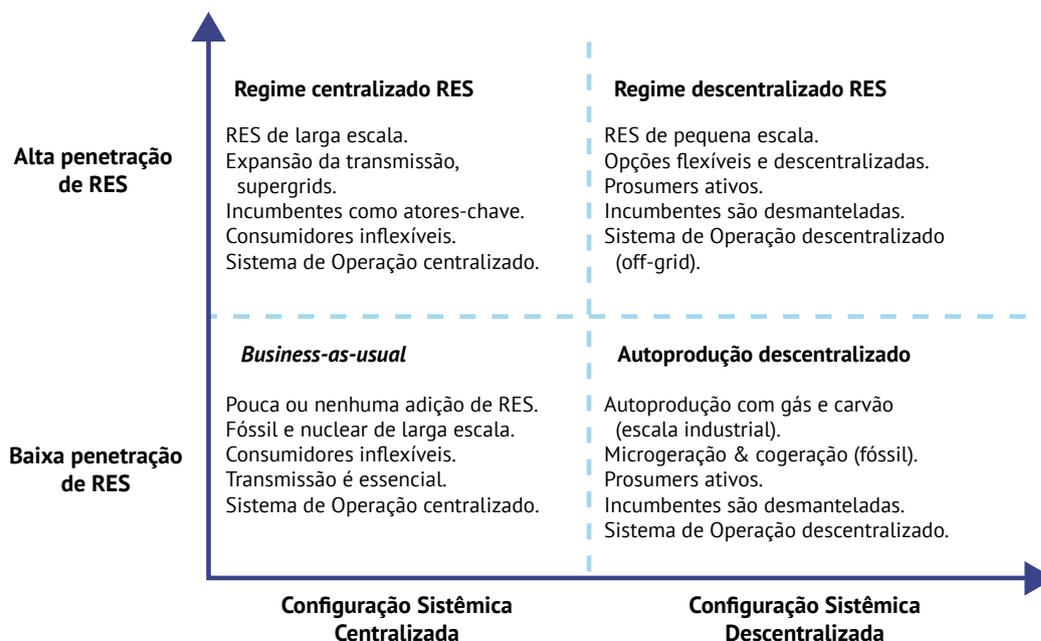


Figura 3. Sentidos da transição e descentralização das fontes renováveis no setor elétrico. Fonte: adaptação de Lindberg, Markard e Andersen (2018).

Esse tipo de abordagem fornece pistas interessantes para o exame das transformações, ainda incipientes, na indústria de aviação que podem favorecer o desenvolvimento e a posterior adoção de SAF.

Um dos problemas centrais da logística de comercialização e distribuição de querosene de aviação (QAV-1, ou JET A-1 em inglês) e gasolina de aviação diz respeito à movimentação do combustível para as bases de armazenamento. Para os grandes aeroportos, o problema é equacionado por dutos dedicados que partem diretamente das refinarias até às bases localizadas nos próprios aeroportos. No caso de não existência de dutos dedicados, o custo da movimentação por trens ou caminhões passa a depender da escala e da demanda. Uma vez mais, os grandes aeroportos podem se beneficiar dessas condições. Assim, a logística de movimentação é centralizada entre os operadores das unidades de refino (no caso brasileiro, só a Petrobras) e as empresas de distribuição que localizam suas bases nos aeroportos.

Para aeroportos pequenos, com um fluxo menor de passageiros e de transporte de carga, o problema se coloca de forma diferente. A distância entre as refinarias e os aeroportos de pequeno porte implica escalas inferiores e, conseqüentemente, custos de movimentação maiores.

Como se verá adiante, este é um desafio e ao mesmo tempo uma oportunidade para o desenvolvimento de combustíveis de aviação produzidos fora do circuito tradicional refinaria-base de distribuição aeroportuária.

A Figura 4 adapta a abordagem de Lindberg, Markard e Andersen (2018) para o desenvolvimento dos SAF. Neste caso, a variável crítica passa a ser a taxa de penetração dos SAF. No quadrante business-as-usual, o uso de SAF é bastante limitado e a logística de comercialização permaneceria a mesma. Caso a taxa de penetração se acelere, mas o regime de logística e comercialização permaneça fortemente centralizado, tal como no quadrante Regime centralizado SAF, as barreiras de economias de escala continuariam favorecendo as empresas incumbentes tradicionais. Em tal cenário, a penetração do SAF, através de mandatos regulamentados de mistura com QAV, tenderiam ainda a favorecer os grandes operadores históricos.

Entretanto, um processo de transição disruptivo poderia ter os contornos assinalados no quadrante Regime descentralizado SAF autônomo/“Produção distribuída”. Nesse caso, a produção de novos combustíveis teria características comparáveis à atividade de geração distribuída no setor elétrico. O traço marcante seria a descentralização da produção, realizada em escalas significativamente menores do que aquelas operadas por grandes refinarias, e localizadas mais próximas de aeroportos de menor porte.

Tal modelo de negócios, em tese, não seria interessante para os atuais incumbentes. Nesse caso, os atuais custos de movimentação de combustível das refinarias para os pequenos/médios aeroportos poderiam ser reduzidos. Isto implicaria a ampliação do número de atores e opções contratuais diferentes das modalidades padronizadas existentes.

Por fim, o último quadrante resultaria num Regime descentralizado dependente, cuja característica seria a coexistência dos dois modelos de produção, logística e comercialização de combustíveis tradicionais e SAF. Porém, ainda que este cenário possa contemplar algum grau de descentralização, sua viabilidade seria comprometida pelo não alcance da condição de autossuficiência do abastecimento de SAF.

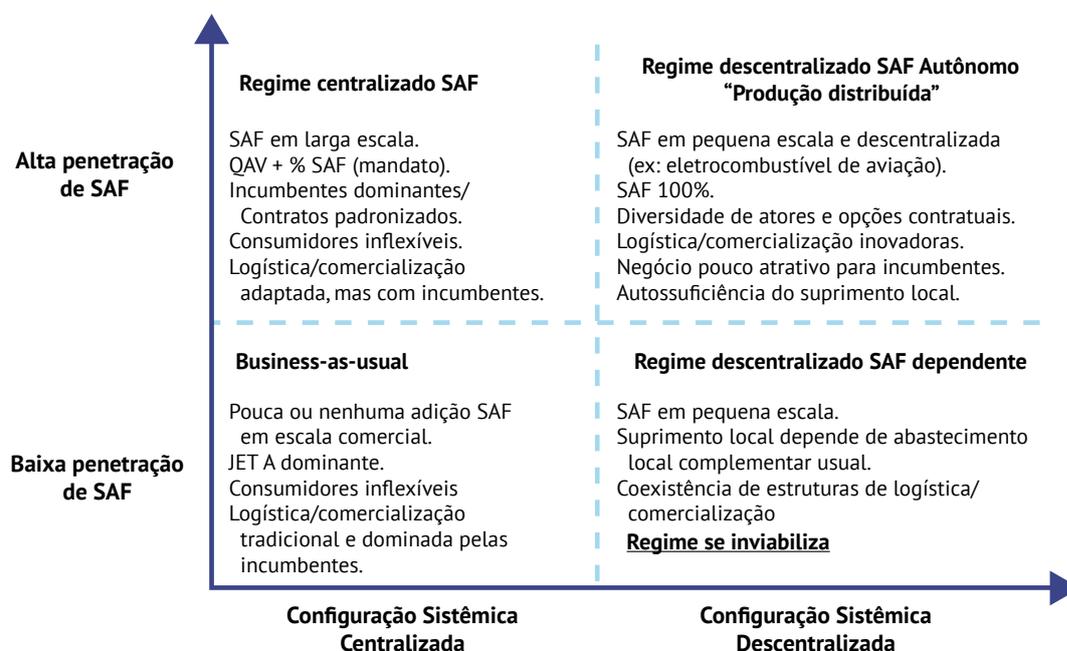


Figura 4. Sentidos da transição e descentralização dos combustíveis de aviação sustentáveis. Fonte: elaboração própria a partir de Lindberg, Markard e Andersen (2018).

Tal como no setor elétrico, a adoção de SAF irá requerer novos instrumentos de política setorial e de regulação, cujos traços marcantes serão destacados a seguir.

2.2 Vetor institucional: mecanismos de coordenação e regulação difusa

As questões e as competências de regulação têm sido caracterizadas, nos últimos anos, pela presença de múltiplos atores institucionais, provocando o que poderia ser caracterizado como a fragmentação das decisões institucionais. Este aspecto é bem observado por Baldwin, Cave e Lodge (2012) que, ao examinarem a importância crescente do Estado regulador ao longo das últimas três décadas, descreveram esse fenômeno como um problema de regulação multinível (multi-level regulation).

Segundo esses autores, a fragmentação da autoridade reguladora traz implicações para o exercício da regulação e para os processos de tomada de decisão. A crescente fragmentação institucional tem valorizado as regras formalizadas e explícitas, e essa tendência tem sido estimulada pela internacionalização de atores econômicos, além de uma confiança mais ampla em contratos formais a serem firmados entre atores.

A presença de diferentes esferas de autoridade institucional para tratar de determinado problema remete ao conceito de regulação difusa, definido como o exercício de tarefas regulatórias repartidas entre instituições, com baixo grau de coordenação (Monnerat, 2018). Tal conceito pode, inclusive, ser articulado com a noção de policy mixes destacada por Lindberg, Markard e Andersen (2018).

A complexidade dos regimes de regulação difusa foi tratada por Monnerat (2018) ao examinar a regulação mineral. A Figura 5 aponta os traços dessa complexidade. Num ambiente de regulação difusa, o papel do regulador setorial pode não ser suficiente. Dada a presença de múltiplos atores, o desenho institucional pode suscitar problemas de sobreposição e lacunas regulatórias. Neste sentido, o desenho institucional envolve múltiplas dimensões, arenas, atores e regras de jogo que nem sempre são convergentes. Por isso, o aspecto fundamental passa a residir na qualidade da coordenação interinstitucional. Quando a autoridade reguladora é difusa e/ou está dispersa entre instituições, atores e níveis de governo, diz-se que os tipos hierárquicos de regulação enfrentam limitações inerentes, levando a modos de regulação que enfatizam a negociação e a deliberação.

Segundo Baldwin, Cave e Lodge (2012), isso levanta a questão das “redes” regulatórias – regimes que envolvem números de reguladores que impactam simultaneamente um problema ou domínio. Esses reguladores podem atuar horizontal e verticalmente entre jurisdições, bem como procurar (ou não) coordenar seus esforços.

Tal como os autores advogam o que é novo em matéria de regulação, atualmente, é precisamente a existência de atividades reguladas por um conjunto de instituições em diferentes níveis de governo. Essa mudança de níveis para cima (supranacional e internacional), para baixo (regional e local) e lateralmente (agências especializadas e departamentos ministeriais) está no centro dos debates sobre quem regula e como se regula.

A fragmentação institucional conduz inevitavelmente a um processo de regulação difusa que envolve um jogo de barganha entre os atores que integram dado desenho institucional. Assim, a regulação se transforma em um processo caracterizado por uma forma de “descentralização”,² ou seja, barganha e deliberação.

² Ou, como destacam Baldwin, Cave e Lodge (2012, p.382): “the implication of this view point is that questions about the appropriate levels at which to regulate are of little relevance: the reality of dispersed regulatory authority transforms regulation into a process characterized by ‘decentredness’, namely bargaining and deliberation”.

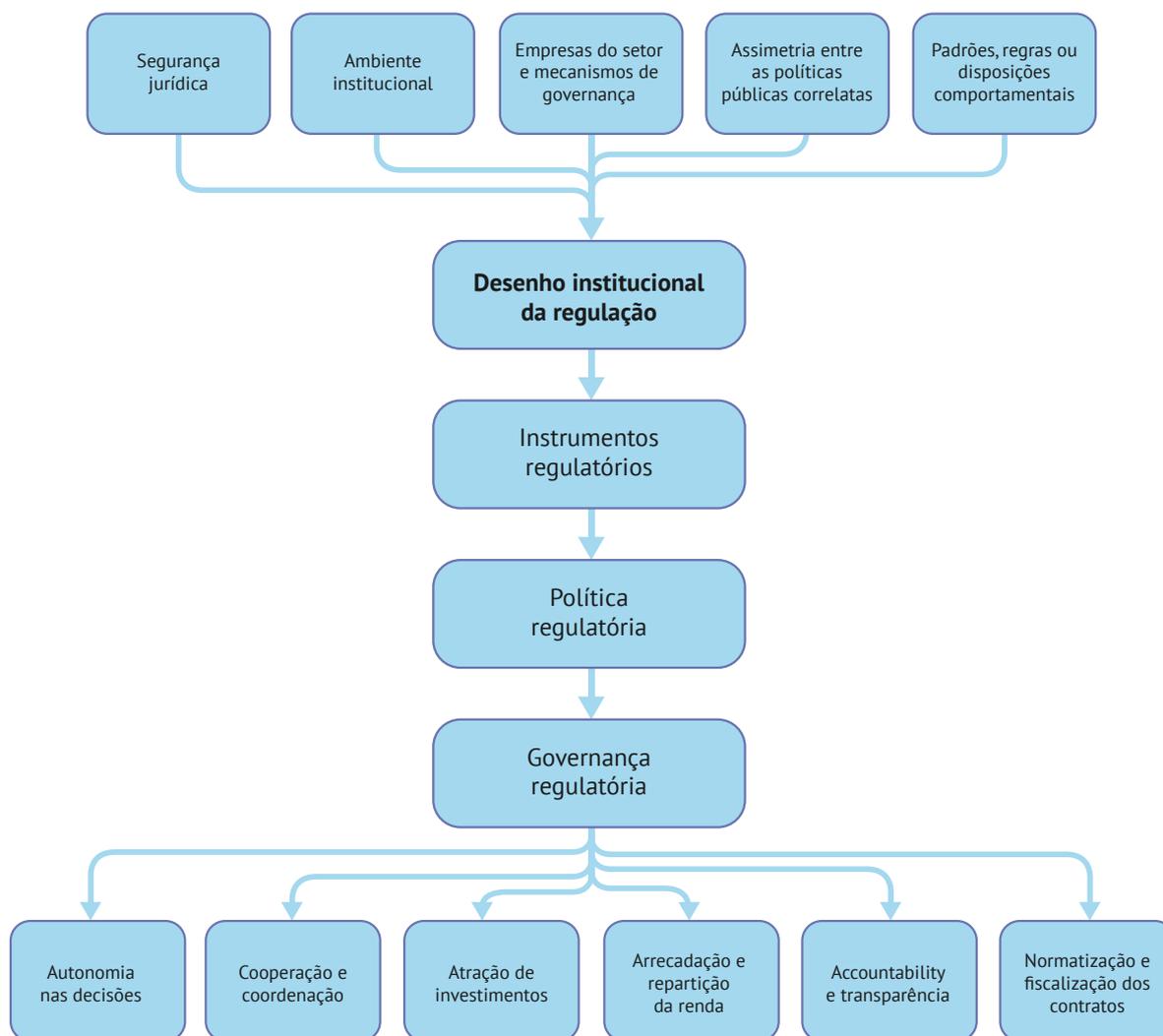


Figura 5. Ambiente de regulação difusa. Fonte: Monnerat (2018).

É interessante notar que o desenvolvimento e a adoção de novos combustíveis tendem a estar articulados com os traços marcantes dos vetores estrutural e institucional de transformação do setor de energia. Em ambos, o potencial disruptivo está associado a um maior grau de descentralização das estruturas industriais e dos desenhos institucionais. O reconhecimento do papel desses vetores e dos desafios é fundamental para a evolução desse processo de transformação.

Isto posto, examinamos, à luz dessa perspectiva, a dinâmica tecnológica e econômica do desenvolvimento de novos combustíveis; e, em seguida, as questões regulatórias e institucionais que podem limitar ou incentivar a adoção de novos combustíveis de aviação.

3 Dinâmica de desenvolvimento de novos combustíveis

A distinção clássica entre inovações de produto e inovações de processo é um bom ponto de partida para entender a dinâmica de desenvolvimento de novos combustíveis. Essa dinâmica se estabeleceu ao longo do século XX numa lógica centrada nas inovações de processo e vem se modificando nos anos recentes numa nova lógica de inovações de produto.

Esta seção explica aspectos-chave da dinâmica de desenvolvimento de combustíveis a partir da compreensão das transformações na lógica de processos e na lógica de inovações de produto; e discute as implicações dessa dinâmica para o caso dos eletrocombustíveis.

No caso dos combustíveis líquidos, a partir das definições que configuraram e compatibilizaram as linhas básicas de oferta e uso, estruturou-se um modelo de negócios que, articulando as dimensões-chave do que poderíamos chamar “sistema de oferta e uso de combustíveis”, passou a prover a necessidade desses combustíveis, adequando-se ao quadro regulatório então definido. Para entender as transformações em curso, é importante identificar essas dimensões-chave. São elas:

- i. Petróleo como matéria-prima.
- ii. Refino como processo de tratamento da matéria-prima.
- iii. Gasolina, diesel e querosene de aviação como produtos principais.
- iv. Equipamentos/motores, como os de ciclos Otto e Diesel e demais usos da aviação e marítimo, definidos para utilizar os principais produtos do refino de petróleo.

Foi justamente a articulação dessas dimensões que consolidou e estruturou o sistema de oferta e uso de combustíveis, definindo um modelo de negócios adequado tanto às condicionantes técnicas – matérias-primas, tecnologias, produtos e equipamentos – quanto ao quadro regulatório vigente.

Esse modelo de negócios, tratado aqui como uma categoria de análise, envolve a forma de estruturação da cadeia, articulando as logísticas de suprimento das refinarias, as condicionantes técnicas e as logísticas de abastecimento dos mercados utilizadores. Esse modelo se tornou dominante ao longo do século XX, em particular a partir do desenvolvimento da indústria automobilística baseada nos motores de combustão interna. Como essa estrutura se manteve estável durante décadas, as inovações passaram a ser essencialmente de processos, envolvendo:

- i. Ajustes em resposta a variações na matéria-prima, principalmente no tocante à qualidade dos tipos de óleo que foram sendo processados.
- ii. Inovações de grande importância no processo de refino, que foram centrais para produzir maior quantidade dos derivados de interesse e menor quantidade de combustíveis e produtos de menor valor. Nesse ponto, foi uma importante inovação de processos a introdução das gerações de tecnologias de refino e conversão, como o craqueamento térmico, o craqueamento catalítico e outros processos de conversão.

- iii. As inovações de engenharia, aumentando a escala das refinarias, o que resultou em redução dos custos unitários.
- iv. As inovações nas formulações para atender as exigências de regulação e especificação dos combustíveis com vistas à adaptação à própria evolução dos equipamentos. A substituição, nos anos 1970, dos aditivos à base de chumbo utilizados na gasolina é um exemplo desse desenvolvimento.

Nesse cenário, a indústria se caracterizava por certa estabilidade do produto, que tinha suas características básicas definidas, isto é, não ocorreriam inovações de produto e o foco seriam inovações de processos. Essa dinâmica se mantém e é reforçada pela trajetória natural (Nelson e Winter, 1977) de ganhos baseados nas economias de escala. O crescimento econômico das refinarias, principalmente no pós-guerra, possibilitado pelas inovações da engenharia química, deu cada vez mais ao sistema de oferta e uso de combustíveis uma característica ao mesmo tempo de otimização e pouca flexibilidade.

3.1 A nova dinâmica de desenvolvimento de combustíveis

Nos últimos anos, a dinâmica de desenvolvimentos de combustíveis, assim como a de produção de energia e materiais, tem passado por grandes transformações. A proposta de produção descentralizada e em pequena escala de combustíveis de aviação se insere nessas transformações, que podem ser vistas como uma mudança de paradigma tecnológico no sentido de Dosi (1982).

A mudança de paradigma leva à busca de soluções que possam constituir novas trajetórias tecnológicas. Nessa reformulação das trajetórias tecnológicas, as dimensões-chave que estruturaram e estabilizaram o sistema de oferta e uso de combustíveis passam a ser variáveis a ser exploradas e não mais dados do sistema.

O ponto de partida dessas mudanças e chave na ruptura da lógica dominante é a mudança de base de matéria-prima que a utilização sustentável de recursos renováveis, em substituição aos recursos fósseis, insere no sistema. A natureza da matéria-prima tem importante efeito estruturante nas indústrias de energia e materiais (Bomtempo, 2012; Spitz, 1988).

A utilização de matérias-primas renováveis – exigindo novos processos de conversão e, em alguns casos, podendo dar origem a novos produtos – leva à necessidade de redefinir a estrutura dominante de oferta e uso. A estrutura da indústria se transforma, e a possibilidade de desenvolver novos combustíveis passa a depender da articulação de quatro dimensões-chave: i. matérias-primas; ii. tecnologias e processos; iii. produtos; e iv. modelos de negócio.

Essas dimensões coevoluem dentro de um macroambiente que envolve as políticas, regulações e tendências da sociedade – na denominação de Geels (2002), a paisagem sociotécnica (Figura 6).

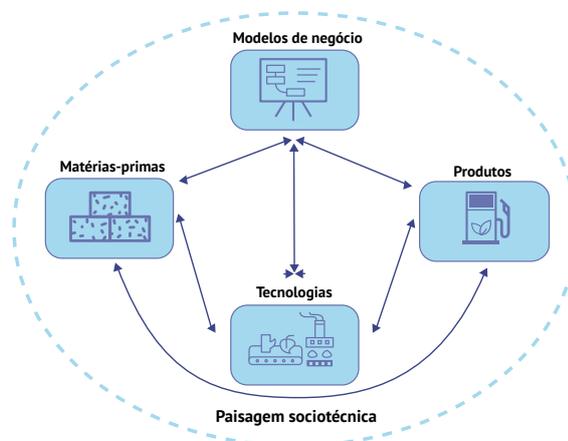


Figura 6. Os novos combustíveis: dimensões-chave em coevolução. Fonte: elaboração própria.

Nessas condições, surgem inovações de produto que exigem mudanças na estrutura de oferta e uso. Os novos combustíveis impõem um dilema crucial: ser adaptados à infraestrutura de distribuição e uso ou exigir adaptações dessa infraestrutura. No primeiro caso, os novos combustíveis são ditos drop-in e, no segundo caso, não drop-in. Dessa forma, a estruturação de um novo modelo de negócios pode ser bastante desafiadora para os agentes envolvidos na inovação em combustíveis.

É o caso da primeira geração de biocombustíveis, como o etanol. No Brasil, nos anos 1980, foi necessário não só adaptar os motores dos automóveis para a utilização do etanol hidratado como também montar uma infraestrutura de transporte e serviços dedicada ao etanol. Nessa situação, o etanol se configurou como um combustível não drop-in.

Nos anos 2000, com a difusão dos carros flex, os motores passaram a rodar com etanol e/ou gasolina em quaisquer proporções. Nessas condições, o etanol se tornou drop-in em relação aos motores. Mesmo assim, a infraestrutura de distribuição é dedicada ao etanol, o que não permite dizer que tenha se tornado inteiramente drop-in.

Isso explica em parte a relativa dificuldade da difusão do etanol (E85, ou mesmo na mistura à gasolina) no mercado americano: a ausência da infraestrutura de distribuição e serviço em todo o território. Note-se, portanto, que, se a adaptação aos equipamentos de uso existentes é o ponto crucial do caráter drop-in de um novo combustível, a infraestrutura de distribuição e serviço também deve ser levada em conta. Essa dimensão está incluída no que denominamos modelo de negócios do sistema de oferta e uso de combustíveis.

A primeira geração de biocombustíveis (etanol de cana-de-açúcar ou milho, biodiesel por transesterificação de óleos e gorduras) representa, assim, a entrada dos chamados biocombustíveis não drop-in, que seriam substitutos imperfeitos no sentido de exigir adaptações do modelo de negócios estabelecido.

Essa restrição dos biocombustíveis de primeira geração exigiu sempre inovações adicionais para estender o uso para novos equipamentos e motores. O etanol, por exemplo, que foi adaptado às condições de uso nos motores de ciclo Otto e se difundiu nesse uso no mercado brasileiro, exigiria inovações nas características do produto, desenvolvendo aditivos especiais, como foi feito na Suécia, para poder ser utilizado nos motores do ciclo Diesel em ônibus e caminhões. Essa inovação não foi adotada no Brasil, o que limitou o uso do etanol aos carros de passeio, apesar da notável capacidade de produção de etanol no país.

Esses biocombustíveis foram ou têm sido desafiados ainda em seu desempenho ambiental (redução insuficiente de emissões em alguns casos, competição com alimentos, uso da terra). Tais limitações levaram à busca de inovações em biocombustíveis avançados que preenchassem um conjunto mais restrito de condicionantes, destacando-se duas delas: desempenho ambiental e adaptação aos equipamentos de uso.

O melhor desempenho ambiental em comparação aos combustíveis de base fóssil significa, em primeiro lugar, uma redução expressiva de emissões. As definições de combustíveis avançados, como as da Environment Protection Agency (EPA), costumam situar essa redução em níveis superiores a 50% em relação aos fósseis substituídos. Nesse caso, o etanol brasileiro costuma ser considerado como combustível avançado, uma condição que lhe permite ser exportado para o mercado americano. A International Energy Agency (IEA), por outro lado,

define biocombustíveis avançados de forma mais restritiva, como os combustíveis que são produzidos de forma sustentável a partir de matérias-primas não alimentícias e que são capazes de apresentar significativa economia de emissões em seus ciclos de vida, comparados aos combustíveis fósseis. Além disso, as matérias-primas não devem competir diretamente com alimentação humana e animal pelo uso da terra ou causar impactos adversos à sustentabilidade (IEA, 2017).

As exigências de sustentabilidade tendem, portanto, a se tornar mais restritivas e ir além da redução de emissões como métrica, incluindo outras variáveis ambientais, bem como variáveis de sustentabilidade social e, naturalmente, econômicas. Neste registro, a Global Bioenergy Partnership (GBEP), uma iniciativa intergovernamental que reúne 50 países e 26 organizações internacionais, elaborou um conjunto de 24 indicadores distribuídos pelos três pilares da sustentabilidade (IEA, 2017). Esses indicadores são vistos como requisitos para o desenvolvimento sustentável da bioenergia.

Um ponto crítico é a sustentabilidade das fontes de matérias-primas. Questões como competição com alimentos e uso direto e indireto da terra têm sido objeto de grandes debates nos últimos anos. Philp (2018) destaca que a busca de padrões de sustentabilidade aceitos e validados internacionalmente seria uma condição para o uso dos recursos renováveis pela bioeconomia. Esses padrões, no entanto, são ainda um desafio.

A segunda condicionante a ser atendida é a de adaptação aos equipamentos existentes, isto é, os novos combustíveis devem ser drop-in. Essa condição se torna crítica nos mercados mais promissores dos biocombustíveis, como aviação e transporte marítimo. Nesses casos, a adaptação dos equipamentos, como a que foi feita para o transporte individual, é considerada inviável.

Essa condição é crítica para mercados importantes a fim de alcançar cenários de redução de emissões, tais como os usados pela IEA (2017). Nesse cenário, prevê-se que os biocombustíveis avançados, em particular os de aviação e marítimos, serão demandados em quantidades expressivas no horizonte 2060. Tal como destaca a IEA (2017, p. 23),

biofuels play a key role in the decarbonization of long-haul transport modes, complementing measures aimed at constraining the sector's energy needs and the enhanced role of electrification and other measures in urban and other shorter-haul transport applications. Biofuels provide some 40% of air transport fuel in 2060, and 30% of bunker fuel for shipping.

Importa destacar que, à medida que as exigências a serem preenchidas pelos biocombustíveis se definem e se tornam mais restritivas (definições e orientações no nível da paisagem sociotécnica), as quatro dimensões-chave –matéria-prima, tecnologia, produto e modelo de negócio – se modificam e buscam novas combinações que permitam compatibilizá-las e desenvolver os novos combustíveis.

3.2 Matérias-primas, tecnologias, produtos e modelos de negócio na nova dinâmica de desenvolvimento de combustíveis

Discutimos a seguir cada uma das dimensões-chave que coevoluem nos processos de inovação e desenvolvimento de novos biocombustíveis.

3.2.1 Matérias-primas

As restrições ambientais têm levado as inovações em biocombustíveis avançados para o uso de resíduos – agrícolas, industriais ou urbanos – ou de matérias-primas cultivadas em condições sustentáveis, como as algas.³

Apesar de promissor, o uso de resíduos enfrenta desafios importantes de logística e organização das cadeias de suprimento. Esses recursos encontram-se em graus variados de dispersão. Em muitos casos, seus mercados podem não estar organizados. Alguns projetos têm conseguido resolver esses desafios, como parece ser o caso da Neste, que tem uma capacidade de produção de mais de 2 milhões de toneladas/ano de diesel renovável e jet fuel, tendo como fonte principal de matéria-prima óleos vegetais residuais.⁴

Além da logística, existem desafios tecnológicos de tratamento desses resíduos para disponibilizar as moléculas e os produtos de partida para os processos de conversão. No caso do etanol lignocelulósico, o biocombustível avançado com mais esforços de pesquisa e desenvolvimento e investimentos realizados, a obtenção dos açúcares simples a serem fermentados tem se relevado um desafio importante para as empresas que estão tentando a passagem para a escala comercial.

Um tipo de resíduo que tem ganhado atenção crescente, tanto em pesquisa e desenvolvimento – por exemplo, o projeto Electrofuels, da ARPA-E (Lane, 2013) – quanto em aplicações já em nível de demonstração (como o voo experimental da Virgin com Lanzatech em outubro 2018) é o próprio gás carbônico.

Tais alternativas apresentam como principais vantagens: i. eficiência no uso de recurso; ii. melhor desempenho ambiental em termos de emissões; e iii. não competição por alimentos e pela terra. Em contrapartida, os desafios e barreiras residem na inexistência de estrutura de oferta (cadeia de suprimento) na necessidade de novas tecnologias de conversão.

3.2.2 Tecnologias

Nesta dimensão, cabe discutir as tecnologias em dois níveis: a tecnologia de conversão em si e o conceito das plantas industriais.

As tecnologias de conversão em desenvolvimento são numerosas e têm graus diferentes de maturidade. Dois fatores contribuem para essa variedade. Em primeiro lugar, a diversidade de matérias-primas condiciona ou favorece o uso de determinadas tecnologias em detrimento de outras. Resíduos urbanos, por exemplo, sugerem o uso da gaseificação para obtenção de gás de síntese a ser convertido pela tradicional rota química catalítica Fischer Tropsch (FT) ou por fermentação, como alternativa proposta por algumas empresas. Já os resíduos agrícolas – materiais lignocelulósicos – têm sido explorados por meio de tecnologias de tratamento que produzem açúcares simples a ser fermentados. Pirólise para a obtenção de bio-óleos e posterior refino seria uma alternativa de conversão dos resíduos lignocelulósicos. Já o hidrotreatamento (HEFA) é a escolha da Neste e de outras empresas para o processamento de óleos vegetais.

³ Uma boa caracterização da natureza, das condições de disponibilidade e do uso das alternativas de matérias-primas pode ser encontrada, para o caso dos Estados Unidos, no Billion-Ton Report (DOE, 2016).

⁴ Ver www.neste.com.

O aproveitamento de resíduos ricos em gás carbônico (CO₂) e outros gases tem sido proposto tanto pela rota FT quanto por rotas de fermentação. Essa variedade de alternativas tecnológicas tende a diminuir com o amadurecimento e os ganhos de eficiência de algumas delas. Mas, dada a variedade de matérias-primas com características físico-químicas muito diferentes, não faz sentido pensar em predomínio de uma rota tecnológica sobre as demais no momento.

A segunda fonte de variedade se deve aos novos conceitos de plantas, as chamadas biorrefinarias integradas. Os conceitos iniciais tendiam a explorar os mesmos princípios da produção de combustíveis a partir do refino de petróleo. A Neste construiu plantas de escala expressiva, algumas ao lado de suas refinarias de petróleo, para o tratamento de óleos vegetais. Essa lógica pode ser defendida pela exploração das utilidades disponíveis e outras sinergias. A produção de etanol celulósico integrada à produção de etanol de primeira geração segue o mesmo raciocínio.

Entretanto, a variedade e a dispersão das matérias-primas têm sugerido que novos conceitos de plantas devem ser explorados. Nessa linha e articulado com a discussão da seção 2, observa-se a existência de uma agenda de desenvolvimento que busca esses novos conceitos para tirar proveito das características das matérias-primas renováveis, valorizando de forma inovadora em relação ao paradigma do refino de petróleo as dimensões como localização regional, escalas menores e exploração de economias de integração com outras atividades, como agricultura e pecuária, ou entre o próprio fluxo de produtos, como combustíveis e químicos.

Os conceitos em desenvolvimento nos remetem às lógicas de eficiência no uso de recursos, preconizados nas abordagens de economia circular, e poderiam ser vistos como a busca de exploração da simbiose industrial. Pode-se admitir que o desenvolvimento, no médio e longo prazos, do uso de recursos renováveis venha a definir conceitos de plantas dominantes ou preferenciais. Entretanto, o estágio atual ainda é muito preliminar para avançar mais do que a tendência a buscar conceitos industriais adequados ao novo paradigma.

3.2.3 Produtos

A evolução dos produtos é pautada inicialmente pela busca de biocombustíveis drop-in. Nessa perspectiva, surgiu uma geração de empresas nos anos 2000 que se propôs a oferecer produtos utilizando tecnologias inovadoras, a maioria baseada em biotecnologia avançada ou biologia sintética, e partindo de matérias-primas nobres, em geral açúcares. Amyris e Solazyme são exemplos importantes dessa geração de empresas.

Amyris e Solazyme são exemplos importantes dessa geração de empresas. Seus produtos eram de grande qualidade e capazes de atender a condição drop-in. Entretanto, as matérias-primas e o próprio processo de conversão tornaram não competitiva essa geração de biocombustíveis drop-in, apresentando custos iniciais elevados e incompatíveis com o uso como combustíveis de grande consumo.

Esses projetos foram, com maior ou menor sucesso, revistos e reorientados para outros produtos especiais, de preços e margens mais elevadas, como os de cosméticos, aromas e fragrâncias, nutracêuticos e outros mercados. Além da competitividade no preço, essa geração de produtos poderia ser desafiada quanto à sustentabilidade das matérias-primas nobres. Mas a adaptação aos açúcares de segunda geração, na qual as empresas pioneiras apostam, deveria ser uma forma de contornar esse problema. Alguns desses produtos ainda almejam os mercados futuros de biocombustíveis de aviação.

Uma nova geração de biocombustíveis tem se desenvolvido seguindo outros caminhos: processos mais simples, como hydrotreated vegetable oil (HVO) e HEFA, e/ou matérias-primas mais baratas, como CO₂ e gases efluentes de unidades industriais e resíduos urbanos. Com esses produtos, visa-se obter não só menores custos como também melhor desempenho ambiental.

Na busca de economicidade e desempenho ambiental tem sido defendida, ainda, a ideia de que as unidades de produção são favorecidas pela combinação de combustíveis e outros produtos, como produtos químicos e outros biomateriais (DOE, 2016a). Esse conceito tem sido incorporado nos programas e chamadas do Department of Energy (DOE): a valorização das biomassas é favorecida pela produção conjunta de bioenergia e bioprodutos.

Na mesma linha, Manninen (2017) compara dois cenários de utilização da biomassa: num deles, considera a produção apenas de bioenergia e, no outro, a produção de bioenergia e bioprodutos integrados numa biorrefinaria. Do ponto de vista ambiental, ambos dão resultados similares. Mas a economicidade da operação é favorecida pela produção integrada.

De todo modo, o volume de biocombustíveis avançados estimados como necessários no cenário 2DS exigiria uma considerável aceleração no atual fluxo de inovações de modo a oferecer ao mercado biocombustíveis com bons desempenhos em termos de ciclo de vida e capazes de ser usados como combustíveis drop-in nos transportes de longa distância, em particular aviação e marítimo.

O Quadro 1 apresenta os estágios de maturidade tecnológica dos principais biocombustíveis de transporte. Note-se que, entre os biocombustíveis avançados, apenas o diesel renovável a partir da rota HVO/HEFA pode ser considerado em estágio de maturidade tecnológica avançada, com ampla utilização. Embora os biocombustíveis de importância comercial, como o etanol 2G e o biometano, possam ser considerados em estágio inicial de comercialização, as demais rotas estão ainda em estágio demo ou piloto/bancada, exigindo, portanto, intensificação dos esforços de pesquisa e desenvolvimento para que os combustíveis estejam disponíveis comercialmente. Uma medida aproximada do nível de maturidade pode ser dada pelo indicador technology readiness level (TRL), que varia de 1 (estágio de inicial de pesquisa em bancada) a 9 (estágio de maturidade plena e disponível para exploração comercial).

| Tecnologia | Estágio | | | | |
|--|----------------|------------|-------------------------|----------------------|-----|
| | Bancada/piloto | Demo | Comercialização inicial | Amplamente difundida | TRL |
| Etanol de açúcar e amido | | | | XXXXXXXXXX | 9 |
| Biodiesel de óleos e gorduras | | | | XXXXXXXXXX | 9 |
| Biometano | | | XXXXXXXXXX | | 7-8 |
| Etanol 2G | | | XXXXXXXXXX | | 7-8 |
| Outras rotas biológicas | XXXXXXXXXX | | | | 1-5 |
| HVO/HEFA | | | | XXXXXXXXXX | 9 |
| Pirólise planta isolada | | XXXXXXXXXX | | | 5-6 |
| Pirólise em coprocessamento com petróleo | | | XXXXXXXXXX | | 7-8 |
| Conversão de gás de síntese | | XXXXXXXXXX | | | 5-7 |
| Liquefação hidrotérmica | XXXXXXXXXX | | | | 1-4 |
| Combustíveis de baixo carbono não biomassa | | XXXXXXXXXX | | | 4-6 |

Quadro 1. Estágios de maturidade tecnológica dos biocombustíveis. Fonte: adaptado de IEA (2017, p. 29).

Em síntese, a dinâmica de desenvolvimento e inovação em combustíveis, partindo dos produtos de primeira geração – etanol de açúcar ou amido e biodiesel de transesterificação de óleos e gorduras –, tem se modificado de forma notável nas duas últimas décadas. A inovação em combustíveis tem se tornado mais complexa e variada em termos de matérias-primas, tecnologias e produtos. Se o cenário oferece oportunidades de atendimento aos requisitos atuais de uma economia de baixo carbono, os desafios são ainda expressivos tanto nas etapas de pesquisa e desenvolvimento da maior parte das alternativas em vista quanto na estruturação dos modelos de negócio que permitirão a articulação de matérias-primas, tecnologias e produtos e o atendimento do quadro regulatório atual.

O Quadro 2 resume as principais características da dinâmica de desenvolvimento de biocombustíveis e sua evolução a partir dos produtos de primeira geração até os produtos inovadores ainda em desenvolvimento. Um novo sistema de produção e uso de biocombustíveis encontra-se, portanto, em construção.

| Combustíveis | Exemplos | Matérias-primas | Tecnologias de conversão | Conceito de plantas | Principal economia | Produtos | Usos mais importantes |
|------------------------|---|--|---|--|---------------------|-------------|---|
| 1ª geração | Etanol: anos 1980 no Brasil e anos 2000 nos Estados Unidos Biodiesel: anos 1990 na Alemanha e anos 2000 em diversos países | Cana-de-açúcar, milho, óleos e gorduras | Estabelecidas | Isoladas ou integradas à produção de alimentos | Escala | Não drop-in | Etanol: Ciclo Otto e diesel com aditivação Biodiesel: ciclo diesel |
| Avançados – 1ª geração | Etanol celulósico nos Estados Unidos e no Brasil | Resíduos ligno-celulósicos | Inovadoras na obtenção dos açúcares simples | Isoladas ou integradas com a 1ª geração | Escala | Não drop-in | Ciclo Otto e Diesel com aditivação |
| Novos avançados | Querosene de aviação | Diversificadas: açúcares, ligno-celulósicos, CO ₂ , algas e outros resíduos | Inovadoras | Busca de integração e diversificação: bioenergia e bioprodutos | Escopo e integração | Drop-in | Aviação e marítimos |

Quadro 2. Evolução dos biocombustíveis. Fonte: elaboração própria.

3.3 A Produção de Eletrocombustíveis

A produção dos eletrocombustíveis, objeto deste estudo, apoia-se em alguns pontos que a inserem na dinâmica de desenvolvimento da bioeconomia e, em particular, de novos combustíveis: produção descentralizada e exploração de conceitos que permitam não só o uso de recursos e matérias-primas disponíveis localmente como também a exploração de modelos de negócio validados regionalmente. Assim, constitui a base de recursos da tecnologia a exploração de fontes de CO₂, industriais ou capturadas da atmosfera, e de eletricidade renovável, principalmente a solar e a eólica.

As novas fontes renováveis de geração de energia elétrica, destacadamente as solares e eólicas, enfrentam o grande problema da intermitência. Uma das soluções em curso para driblar tal irregularidade é o desenvolvimento de baterias elétricas. Porém, as baterias elétricas ainda precisam superar uma série de desafios, e a eletrificação dos meios de transporte pesados e aeronáuticos está longe de ser uma realidade.

Outra forma de armazenar energia elétrica de fontes intermitentes é sua utilização para a produção de combustíveis líquidos, os eletrocombustíveis (PtL). Combustíveis líquidos são de fácil armazenamento e, se forem drop-in, podem utilizar a infraestrutura já existente e, inclusive, ser usados na aviação.

A tecnologia de interesse neste relatório combina energia elétrica, CO₂ e água para a produção de combustíveis de aviação; porém, é possível produzir diversos outros combustíveis. O combustível é produzido em quatro etapas principais (Mennicken, Janz, & Roth, 2016): i. eletrólise a vapor de óxido sólido de alta temperatura; ii. conversão de CO₂ via reação reversa de gás-água;⁵ iii. Síntese de Fischer-Tropsch; e iv. upgrade do produto Fischer Tropsch (petróleo sintético cru).

A primeira etapa tem como objetivo a produção de hidrogênio por meio da eletrólise da água. Na segunda etapa, o CO₂ capturado e o hidrogênio obtido na etapa anterior são combinados para gerar a mistura de gases, o gás de síntese, nas proporções adequadas para a conversão em hidrocarbonetos que ocorre na terceira etapa. Na terceira etapa, por meio da clássica síntese de Fischer-Tropsch, o gás de síntese é convertido em um petróleo sintético cru e limpo (sem contaminantes tipo enxofre). Consequentemente, esse petróleo sintético é transformado, por diversos processos químicos, em produtos finais de interesse – no caso, os combustíveis de aviação. As empresas alemãs Sunfire e Ineratec já têm demonstrado o processo até o petróleo sintético cru.

Uma questão central para o uso dessa tecnologia é a possibilidade de explorar fontes locais de CO₂. Em linha com os aspectos destacados na seção 2, observa-se que a descentralização produtiva e a consequente possibilidade de produção próxima aos centros consumidores são dependentes dessa possibilidade.

Na ausência de fontes industriais, como cimenteiras, siderurgias ou refinarias, o CO₂ utilizado pode ser proveniente da captura do ar. Tecnologias para a captura do CO₂ têm sido desenvolvidas por empresas como a suíça Climeworks (2018), que criou equipamentos com uma estrutura modular, que pode ser implementada em diferentes ambientes e condições.

O pleno desenvolvimento dos atributos e as vantagens potenciais dos SAF vinculam-se aos vetores estrutural e institucional que destacamos aqui. No caso dos SAF, a barreira regulatória é ainda mais crítica do que no caso dos combustíveis automotivos, devido às exigências de segurança operacional e certificação internacional. Esse tema é tratado na próxima seção.

5 A célula CoSOEC desenvolvida pela Sunfire faz as duas etapas num só passo, que converte H₂O e CO₂ em CO, H₂ e O₂.

4 Arcabouço legal e regulatório e diretrizes de políticas:

Etapas para a regulamentação de eletrocombustíveis renováveis

Entre os desafios enfrentados para o desenvolvimento de SAF, está a necessidade de atingir rigorosos padrões internacionais de qualidade. Cabe ressaltar que o rigor na busca de padronização das características químicas e físicas também incide sobre o tradicional querosene de aviação, derivado do petróleo, uma vez que é preciso garantir que as aeronaves em voos internacionais possam contar com QAV-1 que ofereçam a mesma performance, independente do país onde abastecem.

Contudo, o processo de certificação para os SAF é mais complexo, visto que requer lidar com uma ampla variedade de matérias-primas e processos de conversão. Além disso, o grande interesse por novas rotas de desenvolvimento de combustíveis alternativos é relativamente recente, e assim também são os atuais processos de certificação (DOE, 2017).

Esses processos têm como objetivo garantir que os combustíveis de aviação produzidos com o uso de matérias-primas que não o petróleo e com técnicas inovadoras possuam características semelhantes ou intercambiáveis com as do QAV-1. Isto é, além dos aspectos relacionados à segurança no uso SAF, busca-se desenvolver combustíveis de aviação que não requerem adaptação na infraestrutura destinada ao QAV-1. O SAF deve ser necessariamente um produto drop-in.

Apesar de existirem diversos processos internacionais de certificação de combustíveis, sem dúvida, o mais aceito é o da American Society for Testing and Materials (ASTM). No caso da certificação do QAV-1, o método aceito internacionalmente, inclusive no Brasil, é o ASTM D1655, que determina as características do querosene de aviação derivado do petróleo. Para o caso dos SAF, apesar de serem necessariamente produtos drop-in, ou seja, que também atendam as especificações do ASTM D1655, uma nova especificação foi necessária, a ASTM D7566 (International Civil Aviation Organization, 2017).

Também chamada de Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons, a ASTM D7566 foi emitida em 2009 e estruturada em cinco anexos. Cada anexo representa uma rota de produção de SAF com base em um determinado escopo de matérias-primas e define as composições e propriedades que os diferentes SAF precisam atingir. A especificação também define o percentual máximo de combustível sintético que pode ser misturado ao combustível tradicional (International Civil Aviation Organization, 2017).

A introdução dos anexos na ASTM D7566 foi feita gradualmente, à medida que se superavam os testes necessários. A Figura 7 apresenta a estrutura dessa especificação, assim como algumas das tecnologias de produção de alcohol to jet (ATJ) presente nos anexos.

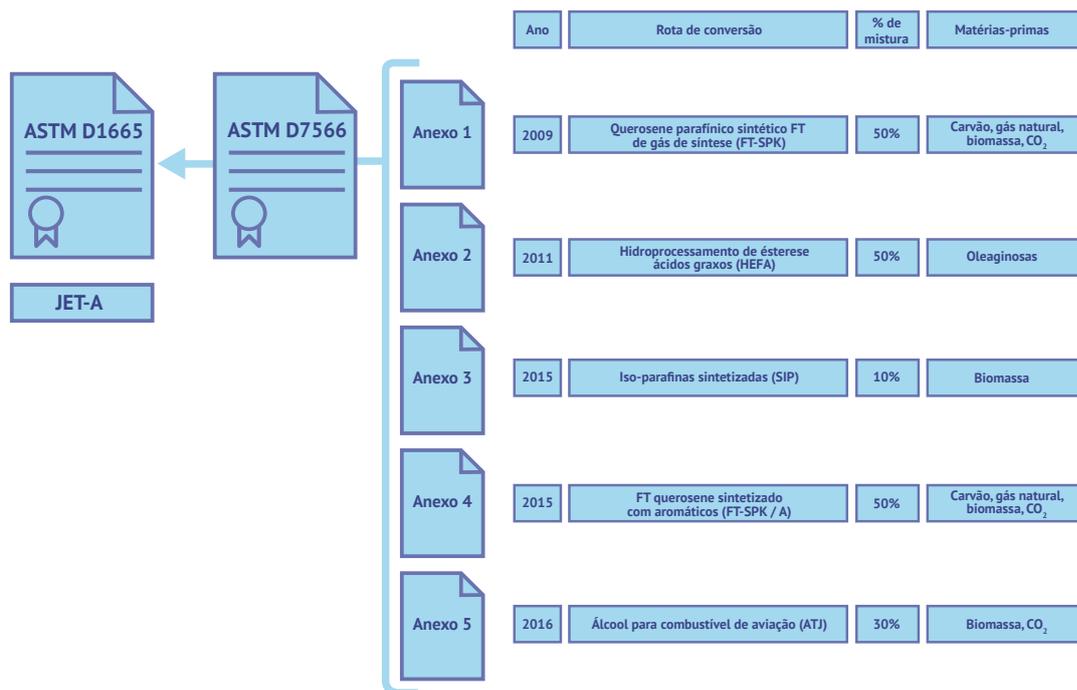


Figura 7. Rotas de produção de SAF aprovadas pela ASTM. Fonte: elaboração própria.

Apesar de serem drop-in, os SAF considerados nos cinco anexos carecem de algumas especificações, de maneira que sua utilização é limitada por porcentagens de misturas máximas. Todavia, uma vez atingidas as especificidades determinadas nos anexos, o SAF pode ser misturado ao QAV-1, passando a ser considerado pela norma ASTM D1665 e podendo ser usado em toda a infraestrutura de aviação civil (International Civil Aviation Organization, 2017).

4.1 Certificação de novos SAF

A certificação de novos SAF e a consequente criação de um novo anexo na ASTM D7566 é possível mediante a realização de uma bateria de testes. O objetivo desses testes é avaliar em que medida o novo combustível pode ser usado pelos equipamentos aeronáuticos sem prejuízo, ou seja, não se busca um combustível idêntico ao QAV-1, mas sim um que possa ser misturado ao QAV-1 e utilizado sem perda de eficiência nos equipamentos (Rumizen, 2017).

A ASTM também elaborou procedimentos que precisam ser seguidos pelo desenvolvedor de um SAF com vistas à sua incorporação na ASTM D7566. O conjunto desses procedimentos encontra-se no ASTM D4054, um processo iterativo que exige do produtor do SAF testes de propriedades básicas de especificação e propriedades de adequação de finalidade, bem como testes em motores e componentes.

Tais processos são rigorosos e requerem atuação conjunta entre os desenvolvedores do SAF e laboratórios, universidades e fabricantes de equipamentos aeronáuticos (Commercial Aviation Alternative Fuels Initiative, 2018). A Figura 8 apresenta os procedimentos presentes na ASTM D4054. A aprovação de um SAF é feita em duas etapas, cada uma dividida em dois estágios.

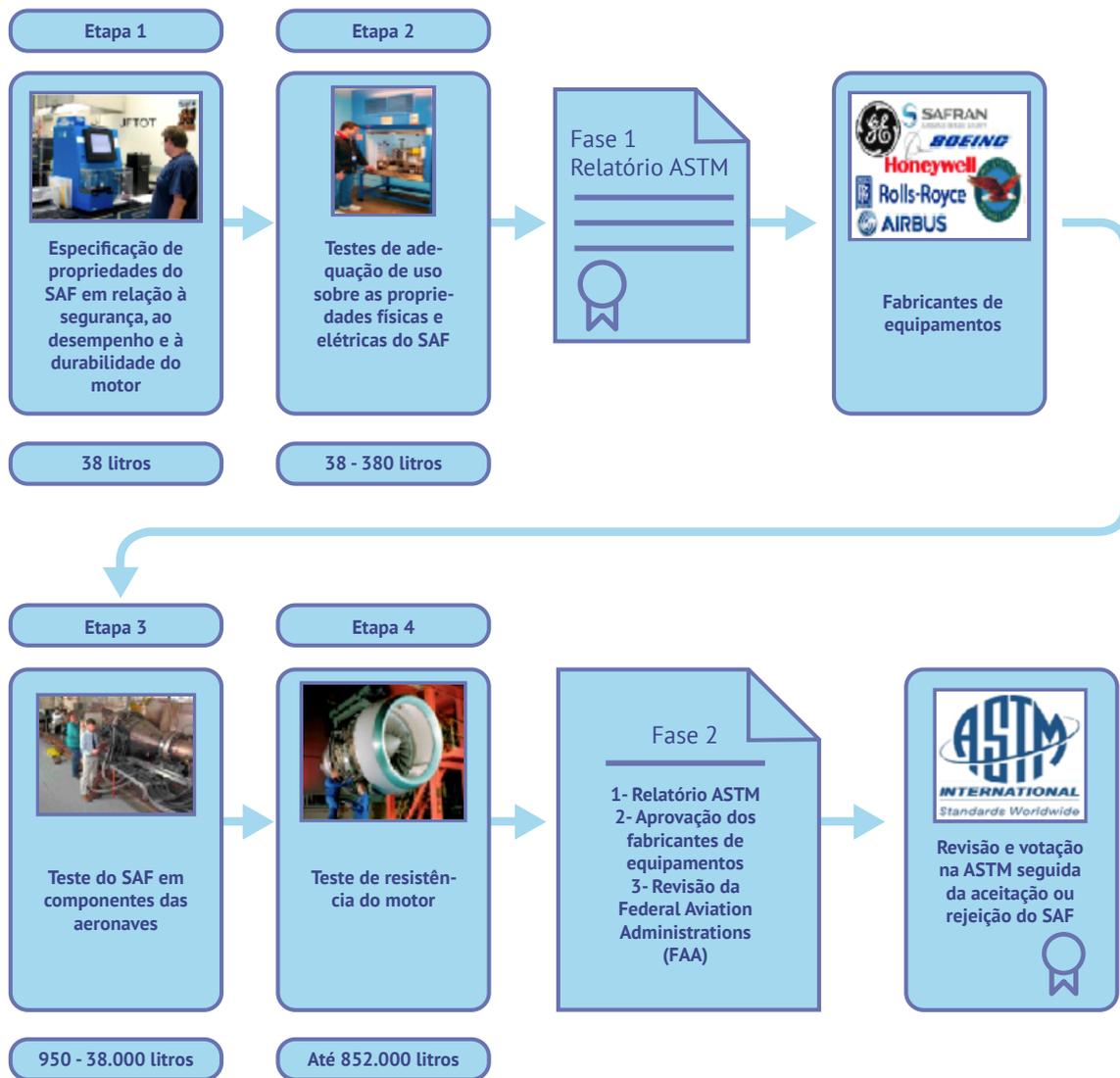


Figura 8. Processo de certificação de um novo SAF pela ASTM. Fonte: adaptação com informações de Commercial Aviation Alternative Fuels Initiative (2018).

O processo ASTM D4054 não visa apenas certificar um produto. Seu objetivo também é certificar o processo de produção de um SAF, quer dizer, assegurar que, conforme a nova tecnologia de produção do SAF ganha escala, as características do produto final sejam mantidas. Não é por outro motivo que as exigências de quantidade produzidas aumentam de forma significativa durante as etapas da certificação, como observado na Figura 8.

Visando acompanhar o processo de desenvolvimento de novas tecnologias de produção de SAF, a Commercial Aviation Alternative Fuels Initiative (CAAFI) criou o fuel readiness level (FRL). O FRL segue a mesma lógica do TRL, um critério bastante difundido e reconhecido, atribuído originalmente à NASA, que mede, numa escala de 1 a 9, o grau de maturidade de uma dada tecnologia. Cada TRL corresponde ao atendimento de certo número de requisitos, sendo 1 o nível mais rudimentar (estágio de pesquisa básica) e 9 o nível de tecnologias prontas para uso comercial. O interessante é que o FRL dialoga com o processo de certificação da ASTM, tanto que incorpora as metas de produção a ser atingidas. A Figura 9 apresenta o FRL.

| FRL | Descrição | Metas a se atingir | Litros |
|-----|---|---|---------------|
| 1 | Princípios básicos identificados e reportados | | — |
| 2 | Formulação do conceito tecnológico | Identificação completa sobre as matérias-primas e os processos | — |
| 3 | Prova do conceito | Produção em escala laboratorial de amostra dos combustíveis com o uso de matérias-primas factíveis. Análise do balanço energético executado para avaliação ambiental inicial. Validação das propriedades básicas do combustível | 0,5 |
| 4 | Avaliação técnica preliminar | Estudos de performance e integração. Avaliação de critérios e especificações de propriedades | 37,8 |
| 5 | Validação do processo | Aumento da escala, saindo do laboratório para a planta-piloto | 302 a 851 mil |
| 6 | Avaliação técnica em larga escala | Aptidão, propriedades do combustível, teste em ensaios e teste motor | 302 a 851 mil |
| 7 | Aprovação do combustível | Combustível aprovado em padrões internacionais | — |
| 8 | Validação comercial | Modelo de negócios validado e acordos de venda com empresas aéreas ou militares | — |
| 9 | Capacidade produtiva estabelecida | Planta em larga escala | — |

Figura 9. Fuel readiness level. Fonte: adaptado de CAAFI (2009).

O processo de certificação de um SAF pode ser demorado e custoso, o que prejudica principalmente pequenas empresas desenvolvedoras. A certificação pode levar entre três e cinco anos e custar em torno de US\$ 12,5 milhões (Csonka, 2016). Uma das principais dificuldades para as pequenas empresas é o escalonamento da produção do SAF necessária para realizar os estágios do teste D4054. Como se observa na Figura 8, os estágios 3 e 4 exigem que a empresa construa capacidade produtiva elevada sem a garantia de que terá seu produto aceito (DOE, 2017).

4.2 Regulação dos combustíveis de aviação no Brasil

A Lei nº 9.478, de 1997, conhecida como Lei do Petróleo, foi um marco na exploração e produção do petróleo e gás natural, assim como no desenvolvimento da cadeia de derivados desses produtos. A lei foi responsável pela liberalização do setor de petróleo e gás e pela quebra legal do monopólio da Petrobras ao longo de toda a cadeia de petróleo e gás. Ela também criou a Agência Nacional do Petróleo (ANP), que passou a ser o órgão responsável por regular as atividades do setor.

Cabe à ANP definir as regras sobre a comercialização, as especificidades químicas e físicas e a fiscalização dos combustíveis, entre eles os de aviação. Além disso, a ANP é um dos órgãos incumbidos de pôr em prática as resoluções do Conselho Nacional de Política Energética (CNPE), que, entre outras atribuições, visa promover o desenvolvimento de novos mercados, valorizar os recursos energéticos e incentivar combustíveis alternativos.

Em função do Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel, lançado em 2004, a Lei nº 12.490 ampliou as atribuições da ANP, que passou a atuar também na cadeia de biocombustíveis, incluindo aqueles destinados à aviação.

As regras para a comercialização dos combustíveis de aviação tradicionais, aqueles derivados do petróleo, são determinadas pela ANP. A Resolução ANP nº 37, de 2009, determina as normas técnicas e de controle de qualidade ao longo da cadeia de fornecimento dos combustíveis de aviação. Devido ao caráter global da aviação civil, as especificações do QAV-1 são alinhadas com aquelas determinadas internacionalmente, principalmente pelo padrão ASTM D1655, citado anteriormente.

Desconsiderando a etapa de exploração e produção de petróleo, a cadeia de distribuição do QAV-1 se apresenta como mostra a Figura 10. Os agentes presentes na cadeia são atualmente definidos nas resoluções da ANP nº 17 (distribuição) e 18 (revenda), de 2006. A Figura 10 apresenta, ainda, a estrutura de fiscalização de controle de qualidade do QAV-1, como definida na Resolução nº 37, de 2009.

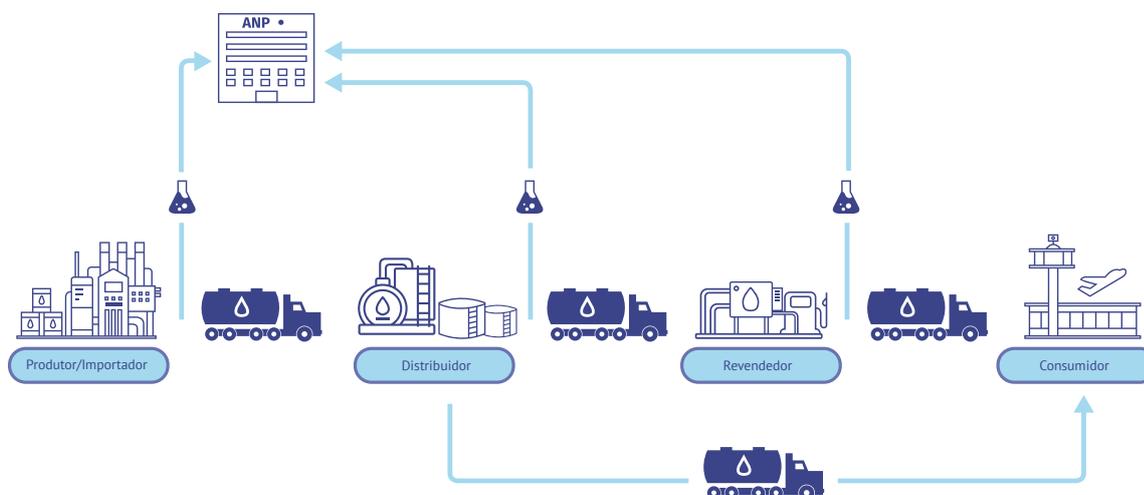


Figura 10. Cadeia de distribuição do QAV. Fonte: elaboração própria.

Para que o QAV-1 avance na cadeia, amostras devem ser enviadas a laboratórios credenciados pela ANP para que suas especificidades sejam comprovadas. O procedimento de controle de qualidade do QAV-1 é feito em cada elo da cadeia para evitar que o combustível sofra alteração à medida que mudam os agentes. A regulação exige ainda que os equipamentos utilizados para transportar o QAV-1 (caminhões-tanques e oleodutos) sigam determinadas especificações. Se comparado com o controle de qualidade dos combustíveis automotivos, o controle sobre os combustíveis de aviação é bem mais restrito, o que é justificado pela busca da padronização do QAV-1 e pelos requisitos de segurança.

A estrutura do mercado do QAV-1 no Brasil é altamente concentrada. A Petrobras é a única produtora do combustível no país. Em 2017, por meio de nove refinarias, a empresa produziu 6.168.600 m³. No mesmo ano, a oferta interna do QAV-1 foi complementada por importações de 575.800 m³ (ANP, 2018). A distribuição do QAV-1 também é concentrada. Apenas três empresas são responsáveis por 99% da distribuição do combustível no Brasil: Petrobras, com uma participação de 56,4%; Raízen, com 31,1% do mercado; e, por fim, Air BP, com 12,4%.

4.3 Cadeia dos combustíveis alternativos de aviação no Brasil

A discussão sobre SAF no Brasil é recente, mas não se distancia do debate internacional sobre o tema, que tomou força em meados dos anos 2000. A inserção brasileira na corrida de desenvolvimento dos SAF foi incentivada pelo acúmulo de experiências na produção e no desenvolvimento de biocombustíveis automotivos. No Brasil, as primeiras iniciativas relacionadas aos SAF foram tomadas por empresas ligadas ao ramo de biodiesel (Fapesp et al., 2013; ICAO, 2018).

Uma das mais importantes iniciativas de fomento aos SAF no Brasil foi a The Brazilian Bio Jet Fuel Platform. O programa envolveu grande diversidade de atores, desde produtores de matérias-primas até consumidores finais, e foi lançado durante a Rio+20 em 2012. Ele resultou no primeiro voo comercial nacional com a utilização de um SAF, em outubro de 2013 (ICAO, 2018).

Ainda em 2012, a ANP abriu consulta pública para dar início ao processo de regulamentação dos SAF no Brasil. Como resultado, em maio de 2013 – portanto, antes do primeiro voo comercial com SAF no Brasil –, a ANP lançou a Resolução nº 20. A resolução buscou alinhamento com as especificações internacionais e considerou como SAF apenas aqueles determinados pela ASTM D7566. Ou seja, os SAF precisam ser necessariamente combustíveis drop-in. Para novos SAF, a regulação no Brasil é também guiada pela ASTM e, conseqüentemente, não há uma resolução para o uso de combustíveis experimentais, como acontece no caso dos combustíveis utilizados em modais terrestres, que seguem a Resolução ANP nº 21, de 2016.

Assim, um SAF produzido por uma rota tecnológica diferente das especificadas pela ASTM D7566 deverá seguir os procedimentos da ASTM para ser certificado pela organização e, posteriormente, utilizado no Brasil.

A Resolução ANP nº 20, de 2013, foi substituída pela Resolução ANP nº 63, de 2014. Esta manteve o alinhamento com os padrões internacionais para as especificações dos SAF e desenhou a estrutura de comercialização dos SAF no Brasil. Ao produtor de um SAF, fica a responsabilidade de garantir a qualidade do produto, que deve seguir as especificações determinadas. Nesta etapa, a comercialização do SAF só é possível após a emissão do certificado de qualidade feito pela ANP. Destaca-se que o produtor deve informar as matérias-primas utilizadas e suas proporções.

Como foi dito, o SAF não é utilizado diretamente nas aeronaves e precisa ser misturado ao QAV-1 segundo as proporções determinadas pela Resolução nº 63. Os critérios da ANP seguem os determinados pela ASTM D7566, todavia, ainda carecem de atualização, visto que só consideram três das cinco rotas possibilitadas pela ASTM.⁶ No Brasil, apenas os produtores, os importadores e os distribuidores de QAV-1 podem realizar a mistura do SAF. O produtor de SAF somente poderá ser responsável pela mistura se também for produtor e/ou distribuidor de QAV-1.

Após a mistura, o QAV-1 passa a se chamar QAV B-X, onde X representa a porcentagem de SAF misturado. Destaca-se que é negada a mistura de diferentes SAF na composição do QAV B-X. Também é vedada a importação de combustíveis que no Brasil seriam considerados QAV B.

⁶ A ANP abriu a Consulta Pública nº 27 em novembro de 2018 com o objetivo de apresentar, entre outras, a proposta de união das resoluções 37/2009 e 63/2014. Entre as propostas, encontra-se também a inclusão dos demais SAF certificados pela ASTM D7566 e a revisão das resoluções nº 17 e nº 18, de 2006.

Tanto o produtor de QAV-1 quanto o distribuidor, após a mistura com o SAF, precisam certificar o QAVB-X de forma a garantir que não houve alteração na composição do SAF e que as especificações referentes ao combustível de aviação foram atendidas. O distribuidor, desde que possua infraestrutura de tancagem no parque de abastecimento de aeronaves, pode comercializar o QAV B-X diretamente com o consumidor final. Caso contrário, a venda é permitida entre distribuidoras e para o revendedor.

Vale reafirmar que o QAV B-X é um combustível drop-in e, portanto, pode ser utilizado na infraestrutura existente para o QAV-1. Nesse sentido, tanto o distribuidor quanto o distribuidor de QAVB-X seguem as resoluções nº 17 e nº 18, de 2006. A Figura 11 é similar à Figura 10, porém, acrescenta os SAF à cadeia.

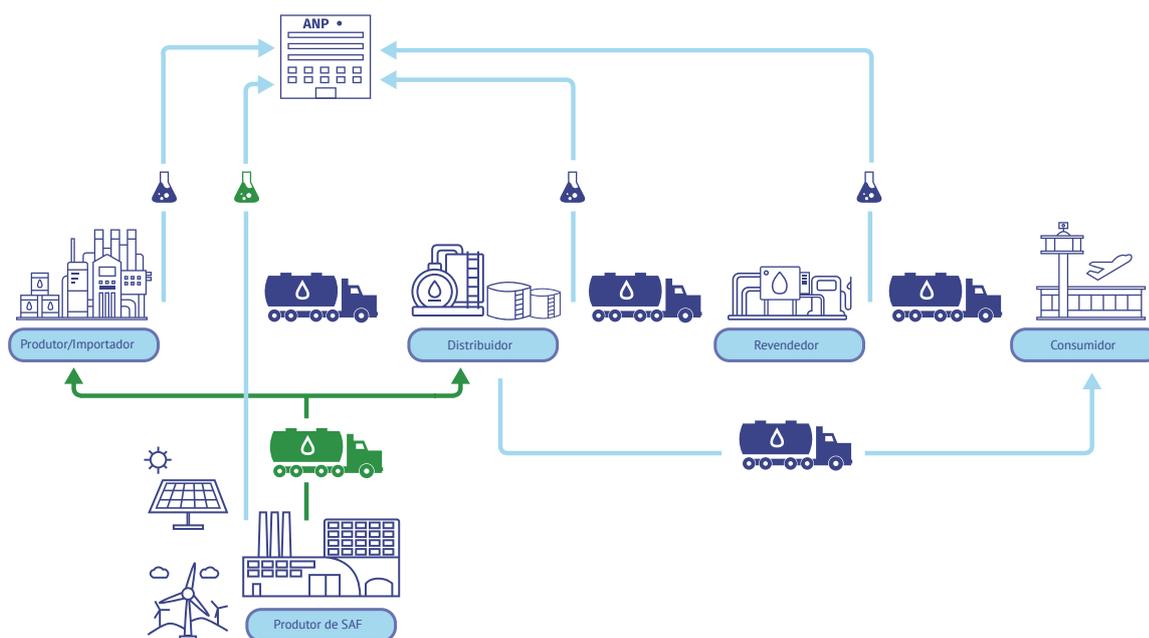


Figura 11. Cadeia de distribuição de SAF. Fonte: elaboração própria.

Isto posto, cabe salientar que, no Brasil, também se usam combustíveis não drop-in na aviação, como é o caso do etanol. O baixo preço do etanol em comparação com o dos tradicionais combustíveis de aviação despertou o interesse de alguns operadores de aviões, principalmente os prestadores de serviços agrícolas, em utilizar o combustível em suas aeronaves.

Por se tratar de um combustível não drop-in, a lógica da utilização do etanol como combustível de aviação seguiu uma relação inversa àquela descrita anteriormente para os SAF. Isto é, em vez de adaptar os combustíveis à infraestrutura e às aeronaves, busca-se a criação de aviões capazes de operar com etanol e a adaptação de motores de aviões tradicionais para que também possam operar com o etanol.

Em 2011, a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) redigiu a Instrução Suplementar nº 137.201-001, que indica as condições aceitáveis de utilização do etanol como combustível de aviação. Na instrução, são descritas as características necessárias às aeronaves que operam com o etanol, assim como regras de voo. Cabe ressaltar que o etanol atende um mercado de nicho, a aviação agrícola, onde as normas de voos são restritas e impedem que a aeronave voe sobre regiões densamente povoadas.

4.4 Os eletrocombustíveis de aviação e os desafios regulatórios

Este estudo tem como foco um SAF específico, chamado aqui de eletrocombustível renovável. Como destacado na seção 3.3, ele recebe este nome porque utiliza como um dos seus principais insumos a energia elétrica. Já o caráter renovável vem da possibilidade de usar fontes renováveis para a sua produção. A energia elétrica utilizada deve ser produzida preferencialmente por meio de painéis solares, turbinas eólicas ou pequenas centrais hidrelétricas.

Cabe neste ponto examinar os principais aspectos tecnológicos do processo de produção de eletrocombustíveis renováveis e seus desafios em matéria de certificação regulatória.

Vale recordar que a tecnologia utiliza como principais insumos o CO₂, a água e a energia elétrica. O CO₂ e a água (H₂O) podem ser obtidos através da captura direta do ar ou do aproveitamento de fontes industriais. A Figura 12 apresenta o processo de produção do PtL e de outros possíveis produtos.

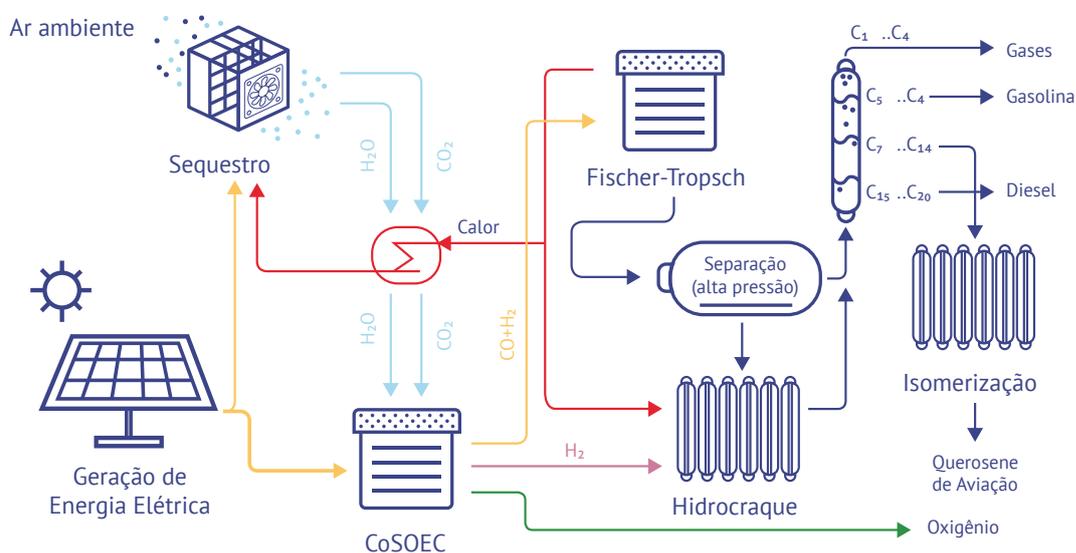


Figura 12. Produção do Eletrocombustível Renovável. Fonte: GIZ (2018).

A grande vantagem do eletrocombustível renovável é a sua possibilidade de produção descentralizada. Não é preciso ligação com redes de transmissão de energia elétrica, e tanto o CO₂ quanto a água podem ser capturados do ambiente. Além disso, o PtL é um combustível com capacidade de redução de gases de efeito estufa. Segundo Falter et al. (2015), a utilização do CO₂ e de energia solar produz um combustível que emite 80% menos gases de efeito estufa que o QAV-1.⁷

No plano regulatório, outro ponto importante é que a tecnologia de produção do eletrocombustível renovável já está certificada pela norma ASTM D7566, por ser baseada na síntese Fischer Tropsch. Ela se adequa aos anexos 1 e 4 e, portanto, é permitida a mistura de até 50% ao QAV-1.

Apesar da certificação, a tecnologia de produção ainda não atingiu escala comercial, encontrando-se em um TRL 6 (Mennicken, Janz, & Roth, 2016).⁸ Considerando a Figura 9, a tecnologia de produção do eletrocombustível renovável está em um nível 6 da escala FRL.

⁷ Os autores referem-se ao Solar Fuel, um combustível similar ao eletrocombustível renovável.

⁸ A tecnologia em questão é a de produção do eletrocombustível de aviação da empresa Sunfire, uma das pioneiras no desenvolvimento do combustível. Site da empresa: <https://www.sunfire.de/en/>.

Esta situação pode parecer contraditória, uma vez que foi argumentado que a certificação de um SAF requer a comprovação de produção em larga escala. Contudo, as rotas tecnológicas contempladas pelos anexos 1 e 4 utilizam o gás de síntese para a produção dos SAF, que pode ser obtido por meio de diferentes matérias-primas e processos. Quando o anexo 1 foi incluído no ASTM D7566, em 2009, o processo de conversão do gás de síntese em combustível já era bem maduro. Na ocasião, a principal matéria-prima utilizada para a produção do gás de síntese era o carvão mineral (Commercial Aviation Alternative Fuels Initiative, 2018).

Com a evolução das questões ambientais, passou a ser interessante a utilização de matérias-primas que auxiliassem na redução das emissões de gases de efeito estufa para a produção do gás de síntese. Os principais projetos envolveram a gaseificação da biomassa, porém, mais recentemente, a utilização do CO₂ passou a ser uma opção crescentemente considerada. Desta forma, apesar de haver maturidade tecnológica na transformação do gás de síntese em SAF, ainda não há maturidade tecnológica na conversão de outras matérias-primas que não o carvão mineral na produção do gás de síntese.

Diversos voos comerciais no Brasil foram realizados com misturas de SAF. Porém, esses combustíveis não foram provenientes de uma produção em larga escala e muito menos puderam contar com uma infraestrutura de abastecimento. Os combustíveis renováveis foram usados em caráter experimental, e seu abastecimento foi feito em forma de campanha.

Como se sabe, apesar de ser um importante player potencial, o Brasil não produz comercialmente combustíveis alternativos destinados à aviação.

Sobre o aspecto regulatório, a insipiência dos SAF dificulta qualquer tipo de prognóstico, visto que novos obstáculos, imperceptíveis no atual momento, devem surgir com o aumento da escala de produção. Apesar disso, este relatório conseguiu identificar alguns problemas iniciais e, com base na experiência com outros combustíveis e na literatura sobre regulação, discutir quais caminhos a regulação deve seguir.

Sobre a certificação de novos combustíveis, pouco pode ser feito pelos reguladores brasileiros, dado o caráter global dos combustíveis de aviação. Atribuir à ASTM a tarefa de certificar os novos combustíveis é lógico, visto que ela já possui aceitação mundial e seus procedimentos são de conhecimento dos agentes do setor. Os problemas relativos ao elevado custo da certificação e à impossibilidade de misturar mais de um SAF serão solucionados conforme a ASTM aprimorar seu processo de certificação. Ao Brasil, cabe investir em laboratórios capazes de se credenciar à ASTM, assim como disseminar informações sobre os procedimentos necessários à certificação de novos SAF.

Cabe enfatizar que desenvolver uma certificação nacional para novos SAF não é factível, pois, diferente do caso do etanol, não há produção economicamente viável de combustíveis alternativos de aviação que justifique a construção de uma infraestrutura própria de abastecimento e adaptações de aeronaves. Além disso, seguir uma certificação nacional seria o mesmo que criar um combustível não drop-in a nível internacional, o que limitaria o uso dos SAF certificados nacionalmente a mercados de nicho nacionais – mercados estes que já podem contar com o etanol, um combustível também renovável.

Quanto ao aspecto tributário, que implicaria às distribuidoras a necessidade de replicar sua infraestrutura, uma solução foi dada pelo programa de governo Combustível Brasil (EPE,

2018). Segundo o comitê responsável pelas discussões tributárias, associar a compra do SAF pela distribuidora com obtenção de créditos de carbono possibilitaria a identificação do “percurso” do SAF durante as transações. O esquema funcionaria da seguinte forma:

- i. A distribuidora adquiriria o SAF e o QAV-1, tendo disponível para comercialização um único combustível, resultante da mistura entre os dois.
- ii. A distribuidora ganharia, com a compra do SAF, o direito de comercializar os créditos de carbono referentes a sua menor pegada ambiental.
- iii. Os consumidores teriam a liberdade de comprar ou o QAV, ou o QAV B. Todavia, os que optassem apenas pelo produto fóssil não teriam a garantia de um produto livre de SAF; eles apenas não receberiam créditos de carbono.

Ressalta-se que as questões tributárias não devem ser resolvidas apenas com a identificação do caminho dos SAF ao longo da cadeia, pois, como dito anteriormente, não há no Brasil uma produção de SAF e o desenho tributário ainda não foi esquematizado. A discussão sobre créditos de carbono remete à estrutura de incentivos à produção dos SAF.

Foi argumentado ao longo do trabalho que seria de interesse das empresas incumbentes o chamado Regime Centralizado SAF, no qual os SAF seriam produzidos em larga escala e a demanda seria determinada segundo algum mandato obrigatório de mistura de renováveis ao QAV. Neste cenário, a infraestrutura construída não seria completamente alterada, mas adaptada à introdução dos novos combustíveis.

Os mandatos de mistura obrigatória são instrumentos regulatórios eficientes para o desenvolvimento de novos produtos, já que criam um ambiente protegido das leis concorrenciais, em que os produtores conseguem acessar o mercado praticando preços mais elevados que os produtos substitutos. Mas este não é um instrumento indicado para o caso dos SAF. Primeiro, a imposição de mandatos mínimos impactaria diretamente o custo de aquisição de combustível pelo setor aéreo, cujas margens de lucro já são estreitas.

Segundo, os SAF podem ser produzidos a partir de diferentes rotas e matérias-primas, o que, conseqüentemente, gera produtos com diferentes pegadas de carbono. A imposição de um mandato faria que o mercado fosse atendido quase exclusivamente pelo SAF mais competitivo, o que inviabilizaria o desenvolvimento de rotas possivelmente superiores em termos ambientais.

Um ponto positivo é que há soluções para os problemas citados. Por exemplo, a consultoria Ramboll (2017) sugere para o caso norueguês, que em 2018 determinou um mandato mínimo de 0,5% de SAF ao QAV,⁹ a criação de um fundo com recursos oriundos da taxa de carbono para o financiamento da compra de SAF. Sobre o segundo ponto, seria possível criar mandatos obrigatórios para diferentes rotas ou então limitar o uso de determinadas matérias-primas, consideradas problemáticas. Todavia, têm sido amplamente difundidos instrumentos regulatórios de mercado, que em tese superam muitas das dificuldades dos instrumentos de comando e controle.

No caso da criação de mercados de carbono, alega-se que as metas de redução de emissões são atingidas da forma mais eficiente possível garantindo liberdade de decisão aos agentes

⁹ A obrigatoriedade da mistura começa em 2020 (Kennedy, 2018).

envolvidos (Ellerman, 2003). Ainda, associar créditos de carbono proporcionais aos benefícios ambientais dos produtos e comercializáveis solucionaria, em tese, o problema de incentivos para diferentes rotas.

No Brasil, o Renovabio busca criar um mercado de créditos de descarbonização para os bio-combustíveis. Nesse caso, cada produtor de combustível renovável recebe créditos de descarbonização relativos à quantidade de CO₂ que seu produto deixa de emitir em relação ao seu substituto fóssil.

Atualmente, apenas o SAF produzido via HEFA está contemplado no programa; porém, segundo o artigo 5º da Resolução nº758, que regulamenta alguns aspectos do Renovabio, agentes interessados podem entrar com o pedido de inserção de novos produtos por meio de uma série de exigências. Porém, tal como visto na seção 3, mesmo com a inserção no Renovabio, a passagem da produção em escala piloto para a escala comercial de muitos SAF ainda carecerá de outras formas de incentivo, como um conjunto de tributação diferenciada, inclusive para a importação de equipamentos, e como subvenção econômica para investimentos em novas plantas produtivas.

No âmbito internacional, é essencial que o Brasil ingresse no Esquema de Redução e Compensação de Emissões da Aviação Internacional (CORSIA, sigla em inglês), que também é um instrumento de mercado, implementado pela International Civil Aviation Organization (ICAO) visando neutralizar o crescimento das emissões de CO₂ provenientes de voos internacionais a partir de 2020. O programa traça metas individuais para as empresas aéreas, que devem reduzir as emissões principalmente com o uso de SAF. Empresas que não atingirem as metas podem comprar créditos de empresas que as superaram.

A implementação do CORSIA será feita em três etapas, sendo as duas primeiras de participação voluntária por parte dos países. Neste período, que se estende entre 2021 e 2026, é importante que o Brasil adira ao programa para que as companhias aéreas de qualquer país sejam obrigadas a compensar suas emissões em voos pelo Brasil, o que estimularia a compra de SAF.

Por fim, é essencial que o mercado de combustíveis de aviação torne-se mais competitivo. Neste sentido, apoia-se o interesse da Petrobras em vender ativos na área do refino e da distribuição de combustíveis, aliado a uma maior interferência do Conselho Administrativo de Defesa Econômica (CADE) no setor com vistas a buscar maiores benefícios associados à competição. A desconcentração, tanto do refino quanto da distribuição, quebraria o atual oligopólio na demanda de SAF, o que permitiria a prática de preços mais justos. Uma maior desconcentração da distribuição também ampliaria o compliance para o Renovabio, visto que distribuidoras menores possuem mais incentivos para evitar a multa por não cumprimento das metas de redução de emissões.

Em um ambiente com maior penetração de SAF, a ANP seria o agente que concentraria a maior parte das ações regulatórias, principalmente por já ser o órgão responsável por regular a cadeia de QAV-1. Porém, com o avanço da descentralização, é essencial que a regulação atenda cada vez mais especificidades locais, o que em tese exigiria maior dispersão da sua atuação. Outro ponto é que as exigências ambientais, que vão além do controle de emissões de gases de efeito estufa, requerem cada vez mais ações conjuntas entre a ANP e outros órgãos. Também, com os mercados de carbono, é esperada maior necessidade de capacitação de outros agentes, como as firmas inspetoras, para atuar como “reguladores substitutos”.

5 Considerações finais

O avanço do uso dos SAF no Brasil e no mundo enfrenta dificuldades técnicas, econômicas e regulatórias. Tais dificuldades são ampliadas devido à natureza global da aviação civil, que exige elevada padronização nas infraestruturas e na qualidade dos combustíveis.

Sobre a busca pela padronização, destaca-se que o Brasil segue as especificações internacionais para os SAF e, com isso, necessita que as agências internacionais certifiquem novos SAF para que estes possam, em seguida, ser incluídos na regulação do país. Como foi visto, por ser muito rígida, a certificação internacional pela ASTM acaba sendo uma das barreiras ao desenvolvimento de novos SAF, uma vez que as empresas precisam despender muitos recursos e tempo para conseguir a certificação do produto.

Para os SAF já certificados, como o caso do eletrocombustível renovável, um dos gargalos a ser superados é a metodologia de cobrança de tributos. No Brasil, como na maior parte do mundo, os SAF são alvo de isenções fiscais, o que torna sua tributação distinta da de um QAV -1. Contudo, os SAF não são utilizados diretamente, mas sim em misturas com o QAV -1, o que cria um terceiro produto, o QAV B, que pode ser produzido com qualquer quantidade de SAF, desde que se respeite o limite máximo de mistura.

Independentemente da quantidade de SAF misturado no QAVB, a propriedade deste último mantém-se estável, tornando difícil avaliar a quantidade exata de SAF presente no combustível, o que inviabiliza o trabalho dos órgãos responsáveis pelo fisco. A mesma dificuldade se observa quando se compartilha a infraestrutura de distribuição entre o QAV e o QAV B. Tais dificuldades tributárias precisam ser superadas, uma vez que é inviável técnica e economicamente construir uma infraestrutura de distribuição dedicada exclusivamente aos três tipos de combustível (EPE, 2018).

Outra barreira ao desenvolvimento dos SAF é a impossibilidade de misturar combustíveis provenientes de diferentes rotas ao QAV. Como há no Brasil grande variedade de matérias-primas potenciais, que podem ser transformadas mais eficientemente em SAF seguindo distintas rotas, a impossibilidade de realizar a mistura com mais de um SAF limita o mercado para os combustíveis alternativos.

No caso do eletrocombustível renovável, um aspecto relevante é que, apesar de usar matérias-primas renováveis, ele não é um biocombustível no sentido clássico, pois não necessariamente utiliza biomassa em sua produção. Desta forma, o eletrocombustível de aviação não está contemplado, por exemplo, pela Resolução ANP nº 63, de 2014, que exige que o produtor do SAF diga no certificado de qualidade do combustível a matéria-prima utilizada, citando apenas três opções: biomassa, carvão mineral e gás natural.

Ainda mais, por não ser um biocombustível no sentido clássico, a inserção do eletrocombustível em políticas voltadas para o desenvolvimento de setores envolvidos na produção de biocombustíveis, destacadamente o Renovabio, pode gerar dúvidas e até sua exclusão destas políticas.

Um ponto importante que precisa ser revisto é a impossibilidade de o produtor de SAF vender o produto diretamente para o revendedor de combustível de aviação. Segundo as regras determinadas pela ANP, os únicos agentes autorizados a misturar o SAF ao QAV-1 são seus produtores e distribuidores. Em ambos os casos, os mercados são concentrados, como foi visto anteriormente.

A oferta do SAF diretamente aos revendedores aumentaria a possibilidade de competição pelo SAF, evitando que os produtores tenham que enfrentar um oligopsônio na demanda pelo combustível. Vale ressaltar que as principais empresas que participam do oligopsônio têm expertise na produção de biocombustíveis. Para elas, a diversificação para a produção do bioquerosene de aviação é um passo quase inevitável.

O reconhecimento desses desafios é indispensável para o desenvolvimento potencial de SAF. Tal como examinado aqui, o percurso é longo e requer mecanismos de coordenação interinstitucional bem adaptados às condições de descentralização produtiva e aos modelos de negócio que irão surgir. E, justamente por se tratar de um longo percurso, os primeiros passos necessitam ser dados desde já.

Referências

ANP. (2018). Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis. Rio de Janeiro: ANP.

Baldwin, R., Cave, M., Lodge, M., (2012). Understanding regulation. Oxford: Oxford University Press.

Bomtempo, J. V. (2012, 30 jul.). O futuro dos biocombustíveis XIII – Matéria prima como fator estruturante da indústria. Blog Infopetro. Disponível em: <https://infopetro.wordpress.com/2012/07/30/o-futuro-dos-biocombustiveis-xiii-a-materia-prima-como-fator-estruturante-da-industria/>.

BP. (2018). BP Energy Technology Outlook 2018. Site oficial BP. Disponível em: www.bp.com.

CAAFI. (2009). Fuel Readiness Level (FRL). Site oficial CAAFI. Disponível em: http://www.caafi.org/resources/pdf/FRL_CAAFI_Jan_2010_V16.pdf.

CAAFI. (2018). ASTM D4054 Users Guide. Site oficial CAAFI. Disponível em: http://www.caafi.org/resources/pdf/d4054_users_guide_v6_2.pdf.

Csonka, S. (2016). Sustainable alternative jet fuel – scene setting discussion. Macon: CAAFI.

Department of Energy (DOE). (2016a). Billion-Ton Report. Disponível em: https://www.energy.gov/sites/prod/files/2016/12/f34/2016_billion_ton_report_12.2.16_0.pdf.

Department of Energy (DOE). (2016b). Biorefinery Optimization Workshop. Summary Report, Chicago, Illinois. Disponível em: https://www.iea-bioenergy.task42-biorefineries.com/upload_mm/3/1/8/2f354df4-3dfd-4efa-90b6-0b8f7b0b85c6_Biorefinery%20Optimization%20Workshop%20Summary%20Report.pdf.

Department of Energy (DOE). (2017). Alternative aviation fuels: overview of challenges, opportunities, and next steps. Chicago. Disponível em: https://www.iea-bioenergy.task42-biorefineries.com/upload_mm/3/1/8/2f354df4-3dfd-4efa-90b6-0b8f7b0b85c6_Biorefinery%20Optimization%20Workshop%20Summary%20Report.pdf.

Dosi, G. (1982). Technological paradigms and technological trajectories. *Research Policy*, 11, 147-162.

Ellerman, A. (2003). Are cap-and-trade programs more environmentally effective than conventional regulation? [Working Paper nº 58676453]. MIT Center for Energy and Environmental Policy Research, Cambridge, MA.

Empresa de Pesquisa Energética (EPE). (2018). Combustível Brasil. Rio de Janeiro: EPE.

Falter, C., Batteiger, V., & Sizmann, A. (2015). Climate impact and economic feasibility of solar thermochemical jet fuel production. *Environmental Science & Technology*, 50, 470-477.

Fapesp, Boeing, Embraer, UNICAMP (2013). Flightpath to Aviation Biofuels in Brazil: Action Plan. Site oficial Fapesp. Disponível em: <http://www.fapesp.br/publicacoes/flight-path-to-aviation-biofuels-in-brazil-action-plan.pdf>.

GIZ (2018, 27 abr.). IKI Combustíveis Alternativos sem Impactos Climáticos: Brasil e Alemanha juntos para uma economia de baixo carbono. ProQR.

Geels, F.W. (2002). Technological transitions as evolutionary reconfiguration processes: a multi-level perspective and a case study. *Research Policy*, 31, 1257-1274.

Helm, D. (2016). The future of fossil fuels—is it the end? *Oxford Review of Economic Policy*, 32(2), 191-205.

International Civil Aviation Organization (ICAO). (2017). Alternative fuels certification process accomplishments. Montreal: ICAO.

International Civil Aviation Organization (ICAO). (2018). Back to initiatives & projects list: Brazilian Biojetfuel Platform (BBP). Disponível em: <https://www.icao.int/environmental-protection/GFAAF/Pages/Project.aspx?ProjectID=31>.

International Civil Aviation Organization (ICAO). (2018). News and activities. Disponível em: <https://www.icao.int/environmental-protection/GFAAF/Lists/SAAFA/SAAFA.aspx>.

IEA. (2017). Technology roadmap, delivering sustainable bioenergy. Disponível em: https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Technology_Roadmap_Delivering_Sustainable_Bioenergy.pdf.

Kennedy, H. T. (2018, Oct. 6). Norway first country in the world to impose biofuel requirements on airlines. *Biofuels Digest*. Disponível em: <https://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2018/10/06/norway-first-country-in-the-world-to-impose-biofuel-requirements-on-airlines/>.

Lane, J. (2013). Can electrofuels and electrosugars save the day? *Biofuels Digest*. Disponível em: <http://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2013/05/24/can-electrofuels-and-electrosugars-save-the-day/>.

Lindberg, M.B., Markard, J., Andersen, A.D. (2018). Policies, actors and sustainability transition pathways: a study of the EU's energy policy mix. *Research Policy*, in press.

Manninen, J. (2017, May 16). Future biorefinery concepts. Presentation at IEA Bioenergy Workshop, "The role of industrial biorefineries in a low carbon economy". Gothenburg. Disponível em: www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2017/05/P01_Future-biorefinery-concepts_Manninen.pdf.

Markard, J. (2018). The next phase of the energy transition and its implications for research and policy. *Nature Energy*, 3, 628-633.

Mennicken, L., Janz, A., & Roth, S. (2016). The German R&D Program for CO₂ utilization—innovations for a green economy. *Research and Education Highlights*, 23, 11386-11392.

Monnerat, M.T. (2018). Governança, desenho institucional e regulação no setor mineral brasileiro (Tese de Doutorado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

Nelson, R., Winter, S. (1977). In search of a useful theory of innovation. *Research Policy* 6, 36-76.

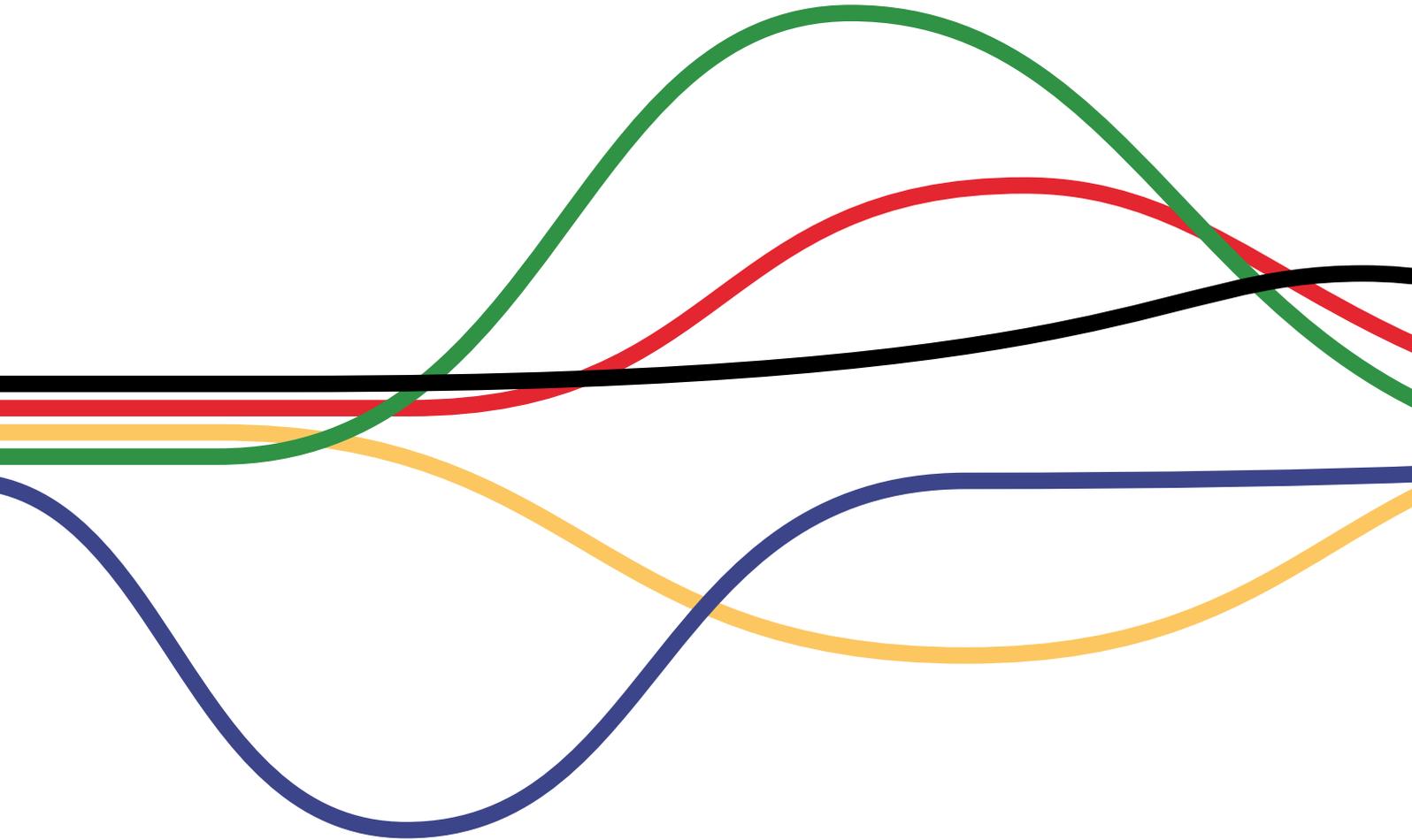
Pinto Jr., H.Q., Bicalho, R., Almeida, E., Iooty, M., Bomtempo, J.V. (2016). *Economia da energia: fundamentos econômicos, evolução histórica e organização industrial*. Rio de Janeiro: Elsevier Campus.

Philp, J. (2018). The bioeconomy, the challenge of the century for policy makers. *New Biotechnology*, 40, 11-19.

Ramboll (2017). Sustainable Aviation Biofuel. Disponível em: http://www.greenaironline.com/photos/Ramboll_Norway_Sustainable_Aviation_Biofuel_Report_August_2017_EN.pdf.

Rumizen, M. (2017). *Biokerosene: status and prospects*. (M. Kaltschmitt, & U. Neuling, Eds.). Berlin: Springer.

Spitz, P. (1988). *Petrochemicals: the rise of an industry*. New York: Wiley-Interscience.



Por ordem do



Ministério Federal
do Meio Ambiente, Proteção da Natureza
e Segurança Nuclear

Por meio da:

giz

Deutsche Gesellschaft
für Internationale
Zusammenarbeit (GIZ) GmbH



DLR

SECRETARIA DE
EMPREENDEDORISMO
E INOVAÇÃO

MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA,
INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES



PÁTRIA AMADA
BRASIL
GOVERNO FEDERAL

da República Federal da Alemanha