

Avaliação de rota de produção de eletrodiesel para o transporte marítimo com o uso de Direct Air Capture

RESUMO

Este trabalho avalia uma rota de produção de eletrodiesel para o setor marítimo baseada em eletricidade solar fotovoltaica e captura direta do ar (DAC). Os resultados apontam as melhores localizações no Brasil para plantas deste combustível e seus potenciais de produção. Estes potenciais são reduzidos, limitados pelo hidróxido de sódio, insumo do processo de DAC. Seu aumento esbarra em dificuldades relacionadas à demanda por área da rota, ao aumento da produção do hidróxido e à destinação do cloro, coproduto de sua fabricação.

Palavras-chave: electrocombustíveis, IMO, captura direta do ar, soda-cloro

ABSTRACT

This work aims to evaluate an electrodiesel production pathway for maritime transportation, based on photovoltaic electricity generation and Direct Air Capture (DAC). Results show hotspots for locating electrodiesel plants in Brazil and their production potentials. These potentials are small and limited by the availability of sodium hydroxide, a DAC feedstock. Increasing this production would face challenges related to the pathway footprint, the need for increasing sodium hydroxide production and the destination of chlorine, its coproduct.

Palavras-chave: electrofuels, IMO, direct air capture, chloralkali process

1. INTRODUÇÃO

A Organização Marítima Internacional (*International Maritime Organization*, IMO) estabeleceu, em 2018, uma estratégia para redução das emissões de gases de efeito estufa (GEEs). Esta estratégia envolve, em 2050, a diminuição nas emissões anuais do setor em 50% em relação aos níveis de 2008 (IMO, 2018). Para alcançar

esta meta, o setor estuda, dentre outras medidas, a introdução de combustíveis alternativos com emissões potencialmente neutras de carbono.

Eletrocombustíveis são produzidos a partir de síntese química entre os gases hidrogênio (H_2), proveniente da eletrólise da água, e dióxido de carbono (CO_2) (BRYNOLF, TALJEGARD, *et al.*, 2018). Caso a eletricidade utilizada no processo seja de origem renovável e neutra em carbono, estes combustíveis são uma alternativa de mitigação de emissões de GEEs.

Os eletrocombustíveis são quimicamente semelhantes aos seus pares fósseis. Dentre os de maior interesse para o setor marítimo está o eletrodiesel (e-diesel) que, por ter a mesma composição do diesel convencional, pode ser diretamente utilizado nos motores de ignição por compressão de dois tempos e grande porte nos quais a frota mercante existente é baseada. Além disso, seu transporte, armazenamento e *bunkering* podem utilizar-se de infraestrutura já existente. Por estes motivos, optou-se, neste trabalho, por avaliar uma rota de produção de e-diesel.

1.1 Descrição da rota avaliada

A eletricidade para o processo deve ser proveniente de fontes renováveis e neutras em carbono. O dióxido de carbono pode originar-se de processos de captura a partir de combustão ou reações químicas (*Carbon Capture*) ou de captura direta do ar (*Direct Air Capture*, DAC). Embora ainda não madura (ou paradoxalmente exatamente por isso), neste trabalho, foi feita a escolha por geração solar fotovoltaica (FV) e captura direta do ar (DAC), já que esta configuração vem ganhando destaque em estudos recentes (FASIHI, BOGDANOV, *et al.*, 2016, LIU, SANDHU, *et al.*, 2020). A Figura 1 ilustra a rota avaliada, destacada pela linha pontilhada. Fora desta linha, estão processos de produção dos insumos necessários e transporte de produtos e coprodutos. Em seguida, descrevem-se as principais etapas.

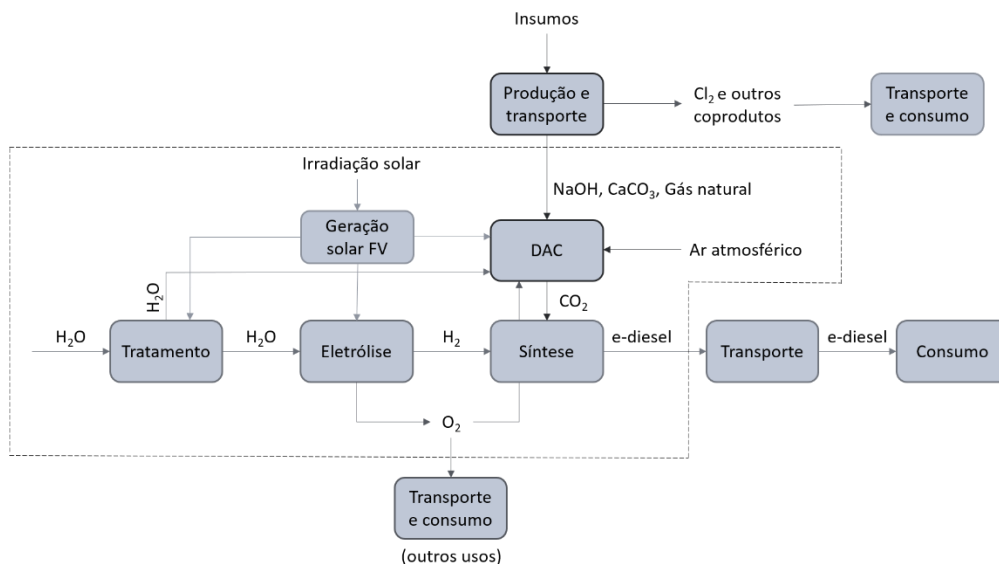


Figura 1 – Rota para a produção de e-diesel a partir de geração solar FV e DAC (Elaboração própria)

1.1.1 – Geração fotovoltaica de eletricidade

A partir da conversão fotovoltaica da irradiação solar, gera-se eletricidade renovável, usada para atender as demandas da rota. Destaca-se que o processo de eletrólise é responsável pela maior parte do consumo de eletricidade.

1.1.2 – Geração do gás hidrogênio

O gás hidrogênio é formado a partir da eletrólise, que se utiliza de eletricidade e água. A água deve contar com alto grau de pureza, de forma que uma etapa prévia de tratamento é necessária. O gás oxigênio (O_2) é um coproduto do processo.

1.1.3 – Captura direta do dióxido de carbono atmosférico

O processo de DAC, que ainda se encontra nas fases iniciais de desenvolvimento, pode basear-se em diversas tecnologias. Dentre as mais promissoras, está o uso de soluções aquosas de hidróxidos fortes (REALMONTE, DROUET, *et al.*, 2019). Considera-se, neste estudo, o uso do hidróxido de sódio (NaOH), dada a sua maior disponibilidade tanto em âmbito mundial quanto no Brasil (REALMONTE, DROUET, *et al.*, 2019). O processo é composto por quatro operações principais, conforme Figura 2.

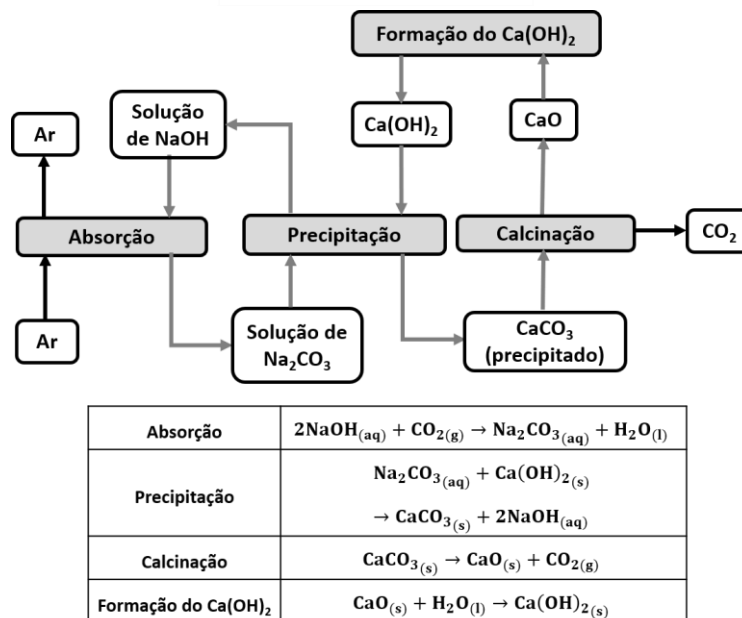


Figura 2 – Descrição do processo de DAC com uso de solução aquosa de NaOH (Elaboração própria)

Na etapa de absorção química, o dióxido de carbono do ar reage com o hidróxido de sódio em solução, formando o carbonato de sódio (Na_2CO_3). Em seguida, ocorre a precipitação, em que o carbonato de sódio reage com o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), regenerando a solução aquosa de hidróxido de sódio e formando um precipitado de carbonato de cálcio. O precipitado é, então, aquecido em um processo de calcinação, decompondo-se em óxido de cálcio (CaO) e dióxido de carbono. Por fim, o óxido de cálcio reage com água e regenera o hidróxido de cálcio.

Os insumos para este processo são, além do ar, a solução aquosa de hidróxido de sódio e o carbonato de cálcio. O processo se dá em dois ciclos, retratados pelas setas claras na Figura 2, que regeneram respectivamente a solução de hidróxido de sódio e o hidróxido de cálcio. Idealmente, os insumos poderiam ser fornecidos ao processo apenas uma vez e regenerados quantas vezes necessário. Entretanto, é sabido que ocorrem perdas ao longo de cada ciclo (BACIOCCHI, STORTI, *et al.*, 2006). Assim, é necessária uma constante reposição de ambos os insumos. Doravante, a quantidade inicial destes recursos fornecida ao sistema será denominada inventário dos produtos, enquanto a reposição será chamada de *make-up*.

O processo de DAC demanda, ainda, eletricidade, atendida pela geração fotovoltaica na rota proposta, e calor. Para o calor, a alternativa considerada é a oxidação do gás natural. O gás oxigênio necessário pode ser obtido da eletrólise da água, e o dióxido de carbono resultante desta queima pode ser facilmente capturado.

1.1.4 – Síntese química

A síntese química, de maneira geral, compreende as etapas de *Reverse Water Gas Shift* (RWGS) e Síntese de Fischer-Tropsch. A primeira consiste na reação entre dióxido de carbono e hidrogênio para formar monóxido de carbono e água. Com isto, forma-se o gás de síntese, composto principalmente por hidrogênio e monóxido de carbono. Este gás, através da síntese de Fischer-Tropsch, gera cadeias carbônicas complexas¹. Entre elas, estão as do *pool* do diesel (C₈-C₁₈) e do *pool* do gasóleo (C₁₆-C₃₀), que também pode ser utilizado para compor o combustível em questão.

1.1.5 – Outros processos

A Figura 1 ilustra outros processos, fora da região pontilhada, que não fazem parte diretamente da rota em questão, mas são de importância para análise. Dentre eles, está a formação dos insumos necessários para DAC. Destaca-se a produção de soda-cloro, que produz hidróxido de sódio e o cloro (Cl₂). Atualmente, o cloro é o principal produto desta indústria, mas a disseminação da tecnologia de DAC tem potencial para reverter a lógica do mercado (REALMONTE, DROUET, *et al.*, 2019), tornando o hidróxido o produto principal e o cloro um coproduto obtido em grandes quantidades.

1.2 Objetivos

O trabalho realizou a análise georreferenciada da rota em questão, apontando as melhores localizações, ou *hotspots*, para a instalação de plantas de produção de e-diesel no Brasil. Calculou-se o potencial de produção do combustível em tais localidades. Avaliaram-se, ainda, fatores que podem trazer restrições ao processo,

¹ O processo de Fischer-Tropsch resulta em uma cesta de produtos. Para este trabalho, foram considerados os seguintes produtos e rendimentos em base mássica: GLP (17,2%), nafta (21,7%), diesel (55,6%), gasóleo (5,5%) (TAGOMORI, 2017).

como a disponibilidade de hidróxido de sódio e o mercado para o cloro formado junto ele, além da demanda por área da planta de e-diesel.

2. METODOLOGIA

Na modelagem georreferenciada, os *hotspots* de produção foram determinados utilizando-se o *software Quantum GIS*, versão 3.10.2. Avaliou-se a localização, no território brasileiro, de recursos necessários ao processo, mercados consumidores para os coprodutos gerados e terminais portuários para a destinação do produto final.

Para cada *hotspot*, realizou-se o cálculo do potencial de produção de e-diesel através de balanços de massa. Neste cálculo, é importante identificar o componente que limita o processo, podendo este ser o recurso disponível proporcionalmente em menor quantidade ou um coproduto ou produto para o qual não haja mercado. Os balanços permitiram, ainda, o cálculo de outros parâmetros relevantes, como a demanda por hidróxido de sódio e por área na planta de produção do e-diesel.

3. RESULTADOS

A análise dos recursos e coprodutos da rota avaliada levou à conclusão de que a localização de plantas de e-diesel deve priorizar a proximidade a plantas de soda-cloro. Isto porque, enquanto a indústria de soda-cloro brasileira é constituída por nove plantas em sete localizações específicas (ABICLOR, 2019), os outros recursos possuem boa distribuição pelo território nacional.

O hidróxido de sódio também é o limitante do processo: os balanços de massa realizados demonstraram que, para o inventário de hidróxido de sódio da planta de e-diesel, grandes quantidades deste produto são requeridas (BACIOCCHI, STORTI, *et al.*, 2006). Por outro lado, a capacidade instalada das plantas brasileiras é limitada e em parte já destinada a outros setores. Enquanto isso, os outros recursos encontram-se disponíveis em abundância.

Três regiões concentram 90% da capacidade instalada de soda-cloro do Brasil (ABICLOR, 2019): os estados de Alagoas, com uma fábrica da Braskem (Maceió/AL),

da Bahia, com fábricas da Braskem e Dow Brasil (nas cidades próximas de Camaçari/BA e Aratu/BA), e de São Paulo, com plantas da Unipar (nas cidades próximas de Santo André/SP e Cubatão/SP). Tendo isto em vista, foram selecionadas as três localizações correspondentes para a produção de e-diesel.

A Tabela 1 resume informações referentes aos insumos e coprodutos. Destaca-se que, apesar de o hidróxido de sódio ter sido considerado o limitante do processo, a demanda por área e a produção de cloro podem vir a trazer restrições devido às grandes quantidades envolvidas.

Tabela 1 – Insumos e coprodutos da rota de produção do e-diesel (Elaboração própria)

Recurso/Coproducto	Aplicação	Detalhamento
Irradiação solar	Geração da eletricidade	Boa distribuição e alta disponibilidade do recurso solar ao longo de todo o território nacional (PEREIRA, MARTINS, <i>et al.</i> , 2017)
Área	Demandada especialmente pelos painéis FV	A disponibilidade de espaço foi avaliada a partir de imagens de satélite (GOOGLE LLC, 2020) dos <i>hotspots</i> .
Água	Consumida na eletrólise e no DAC	Visto que a produção de soda-cloro se encontra em áreas litorâneas, opta-se pelo uso de água do mar.
NaOH	Insumo de DAC	Limitante do processo
CaCO ₃	Insumo de DAC	Minas de calcário estão bem distribuídas, havendo produção em praticamente todos os estados (J. MENDO CONSULTORIA, 2009)
Gás natural	Insumo de DAC	Usado em pequena quantidade no processo. Há redes de distribuição nas localidades em questão (EPE, 2016)
Gás oxigênio	Insumo de DAC e coproduto da eletrólise	O oxigênio gerado na eletrólise atende à demanda do DAC. Porém, não é totalmente consumido no processo, podendo atender também à demanda de plantas próximas, visto que as localidades propostas se situam em áreas industriais
Cloro	Coproducto da produção de NaOH	Pode tornar-se um limitante do processo caso se produza mais cloro do que o mercado brasileiro ou mesmo mundial pode absorver

Os mapas da Figura 3 mostram os *hotspots* para produção de e-diesel, bem como os terminais portuários considerados São eles os terminais de Santos/SP, Ilha d'Água/RJ, Paranaguá/PR e São Luís/MA, quatro importantes terminais aquaviários do país em termos de importação e exportação (MDIC, 2019).



Figura 3 - *Hotspots* para produção de e-diesel no Brasil (Elaboração própria)

O cálculo do potencial de produção foi feito através de balanços de massa e é função da quantidade disponível do componente limitante do processo, o hidróxido de sódio. Considerou-se, para os cálculos, que cada uma das plantas de soda-cloro nas localizações selecionadas utilizaria sua capacidade disponível, calculada a partir do fator de utilização para o setor (ABICLOR, 2019), e que esta seria dedicada por um ano para formação do inventário para a partida da planta de e-diesel.

Na Tabela 2, apresenta-se um resumo do potencial de produção de e-diesel de cada *hotspot*, bem como da distância aos portos atendidos. O potencial total, considerando-se os três *hotspots*², é de 6600 TJ/ ano.

² Existe um plano de paralisação das atividades das fábricas da Braskem em Maceió (BRASKEM, 2020) e Camaçari (CORREIO, 2020). Em um cenário sem estas fábricas, a Dow e a Unipar ainda correspondem a 85% da capacidade instalada do Brasil, justificando a escolha de suas regiões como *hotspots*. Neste cenário, haveria dois *hotspots* com potenciais de 1940 TJ/ano e 2410 TJ/ano, respectivamente.

Tabela 2 – *Hotspots*, potenciais de produção e distância aos portos (Elaboração própria)

<i>Hotspot</i>	Potencial de produção de e-diesel ³ (TJ/ano)	Porto	Distância (km)
São Paulo	2.410	Paranaguá/PR	475
		Santos/SP	20
		Ilha d'Água/RJ	495
Bahia	2.270	São Luís/MA	1.560
Alagoas	1.920	São Luís/MA	1.615

Além do e-diesel, os três *hotspots* produzem, em conjunto, 2460 TJ/ano de nafta e 2040 TJ/ano de GLP, outros produtos químicos de composição idêntica aos derivados fósseis.

Avaliou-se, ainda, a demanda por área e a produção de cloro associada ao hidróxido de sódio, elementos podem trazer restrições à rota em questão.

Em relação à área, em média, cada *hotspot* demanda 8 km², com variações em torno deste valor a depender da incidência solar da região, visto que esta demanda se deve principalmente ao uso de painéis fotovoltaicos. Os painéis utilizados pela eletrólise são responsáveis pela maior parte do espaço necessário, cerca de 90% da área total.

A demanda por hidróxido de sódio, considerando-se tanto a formação do inventário quanto o *make-up*, foi calculada em cerca de 15 t/TJ_{combustível}. Isto resulta, somando-se os três *hotspots*, em 0,38 Mt de cloro formadas em conjunto com o inventário de hidróxido, além cerca de 0,081 Mt/ano formadas junto ao *make-up*.

O mercado de cloro no Brasil, segundo média dos últimos 5 anos, é de aproximadamente 1,12 Mt/ano, sendo que grande parte é produzida internamente, com menos de 1% de importações (ABICLOR, 2019). O mercado mundial é de 76,8 Mt/ano (REALMONTE, DROUET, *et al.*, 2019), ou seja, o mercado brasileiro representa cerca de 1,5% do global. A produção de cloro associada ao inventário dos três *hotspots* equivaleria a 34% do mercado nacional, configurando-se como um excedente. Nos anos seguintes, o *make-up* levaria, anualmente, a um excedente de 7% de cloro. Portanto, é primordial uma avaliação de possíveis aplicações para estes excedentes. Uma possibilidade para o Brasil seria deixar de importar este produto e, ainda, passar

³ Potencial incluindo tanto as cadeias do *pool* do diesel quanto aquelas do *pool* do gasóleo.

a exportar. Considera-se que estes excedentes sejam compatíveis com uma estratégia de exportação, já que representam frações de 0,5% e 0,1% do mercado mundial, respectivamente.

4. DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

O potencial de produção de e-diesel dos *hotspots* em questão foi comparado ao bunker consumido nos portos brasileiros (EPE, 2019), consistindo em cerca de 3% do valor total necessário nos portos. Também foi realizada uma comparação com o valor médio da produção de óleo combustível por refinarias brasileiras, que é de cerca de 25.000 TJ/ano (ANP, 2019). Este valor é até 13 vezes maior do que os potenciais de e-diesel da Tabela 2. Ressalta-se que, embora a produção total de óleo combustível das refinarias não seja inteiramente destinada ao setor de transportes marítimos, esta serve como uma referência para comparação. *Grosso modo*, metade do óleo combustível produzido nacionalmente destina-se a combustíveis marítimos (EPE, 2019).

Para aumentar os potenciais dos *hotspots* selecionados, é necessário aumentar os parâmetros das plantas de e-diesel propostas, incluindo a formação do inventário de hidróxido de sódio, que atualmente se encontra limitado pela capacidade disponível das plantas de soda-cloro atualmente existentes.

Soluções possíveis seriam operar as plantas de soda-cloro existentes por alguns anos para formar o inventário ou criar novas plantas de soda-cloro de grande porte. A primeira alternativa agrava os excedentes de cloro, a demanda por área da planta de e-diesel e é improvável devido aos longos tempos envolvidos. A segunda se mostra inviável por diversos motivos, dentre os quais o elevado custo de capital das plantas de soda-cloro, a geração de excedentes de cloro que podem chegar à ordem de grandeza do mercado mundial e a alta demanda de área da planta de e-diesel.

Conclui-se, assim, que a rota FV-DAC para a geração de e-diesel para embarcações, apesar de promissora para compor a estratégia de redução de emissões de GEEs do setor marítimo, resultaria, no Brasil, em reduzido potencial de produção. O aumento deste potencial esbarra na produção existente de hidróxido de sódio, limitante

do processo, bem como nas altas demandas por área e na dificuldade de se dar destino às grandes quantidades de cloro coproduzidas.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABICLOR. **Relatório estatístico do setor de soda-cloro**. . [S.l: s.n.], 2019. Disponível em: <http://www.abiclor.com.br/wp-content/uploads/2020/04/Abiclor-Relatorio-Estatistico-2019.pdf>.

ANP. **Anuário estatístico brasileiro. Anuário ANP do petróleo, gás natural e biocombustíveis**. [S.l: s.n.], 2019.

BACIOCCHI, R., STORTI, G., MAZZOTTI, M. "Process design and energy requirements for the capture of carbon dioxide from air", **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 45, n. 12, p. 1047–1058, 2006. DOI: 10.1016/j.cep.2006.03.015. .

BRASKEM. **Canal de informações sobre Alagoas**. 2020. Disponível em: <https://www.braskem.com.br/alagoas>. Acesso em: 3 maio 2020.

BRYNOLF, S., TALJEGARD, M., GRAHN, M., *et al.* "Electrofuels for the transport sector: A review of production costs", **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, n. May, p. 1887–1905, 2018. DOI: 10.1016/j.rser.2017.05.288. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.288>.

CORREIO. **Camaçari: Braskem paralisará unidade de produção em abril de 2020**. 2020. Disponível em: <https://www.correio24horas.com.br/noticia/nid/camacari-braskem-paralisara-unidade-de-producao-em-abril-de-2020/>. Acesso em: 3 maio 2020.

EPE. "Infraestrutura de Gasodutos de Transporte no Brasil", **Empresa de Pesquisa Energética**, p. 30062016, 2016. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/mapa-da-infraestrutura-de-gasodutos-de-transporte>.

EPE. "NOTA TÉCNICA - Precificação de óleo combustível marítimo para cabotagem", **Empresa de Pesquisa Energética**, 2019. .

FASIHI, M., BOGDANOV, D., BREYER, C. "Techno-Economic Assessment of Power-to-Liquids (PtL) Fuels Production and Global Trading Based on Hybrid PV-Wind Power

Plants", **Energy Procedia**, v. 99, n. March, p. 243–268, 2016. DOI: 10.1016/j.egypro.2016.10.115. Disponível em:

<http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2016.10.115>.

GOOGLE LLC. **Google Maps**. 2020. Disponível em: <https://www.google.com.br/maps>. Acesso em: 3 maio 2020.

IMO. **UN body adopts climate change strategy for shipping**. 2018. Disponível em: <http://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/Pages/06GHGinitialstrategy.aspx>.

Acesso em: 8 mar. 2020.

J. MENDO CONSULTORIA. **Perfil da Cal.** . [S.l.: s.n.], 2009. Disponível em: http://www.mme.gov.br/documents/36108/449811/P46_RT72_Perfil_do_Cal.pdf/683f97eb-faa3-0c8f-7473-1dbd9f818157?version=1.0&download=true.

LIU, C. M., SANDHU, N. K., MCCOY, S. T., *et al.* "A life cycle assessment of greenhouse gas emissions from direct air capture and Fischer-Tropsch fuel production", **Sustainable Energy and Fuels**, v. 4, n. 6, p. 3129–3142, 2020. DOI: 10.1039/c9se00479c. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1039/C9SE00479C>.

MDIC. **Sistema de Análise das Informações de Comércio Exterior**. 2019.

PEREIRA, E. B., MARTINS, F. R., GONÇALVES, A. R., *et al.* **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. . São José dos Campos, [s.n.], 2017. Disponível em: <http://urlib.net/rep/8JMKD3MGP3W34P/3PERDJE>.

REALMONTE, G., DROUET, L., GAMBHIR, A., *et al.* "An inter-model assessment of the role of direct air capture in deep mitigation pathways", **Nature Communications**, v. 10, n. 1, p. 1–12, 2019. DOI: 10.1038/s41467-019-10842-5. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1038/s41467-019-10842-5>.

TAGOMORI, I. **Potencial técnico e econômico para a produção de Fischer-Tropsch Diesel a partir de biomassa (FT-BTL) associada à captura de carbono no Brasil**. 2017. 216 f. UFRJ, 2017.