

Análise Bibliométrica e de Patentes sobre Catalisadores Utilizados na Síntese de Fischer-Tropsch para Produção de Bioquerosene de Aviação

Bibliometric and Patent Analysis of Fischer-Tropsch Synthesis Catalysts for SAF Production

Jorge Arce Castro¹

Artur José Santos Mascarenhas¹

Silvio Alexandre Beisl Vieira de Melo¹

Yanier Sánchez Hechavarría¹

¹Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA, Brasil

Resumo

Este estudo examina a síntese de Fischer-Tropsch (FT) na produção de bioquerosene de aviação (BioQAV) – em inglês, *Sustainable Aviation Fuel*, SAF –, essencial para a sustentabilidade e a redução de emissões de CO₂ no setor aéreo. Desenvolvida por Franz Fischer e Hans Tropsch nos anos 1920, a síntese de FT converte gás de síntese em hidrocarbonetos líquidos usando catalisadores de ferro ou cobalto. Crucial para gerar combustíveis líquidos a partir de carvão, gás natural ou biomassa, a FT é relevante em lugares em que o petróleo é escasso ou caro. O estudo realiza uma análise bibliométrica e patentométrica sobre catalisadores FT, focando na produção de SAF. Foram revisados 1.236 artigos de 2003 a 2024, obtidos nas bases Scopus e Web of Science, com a China liderando em publicações científicas, seguida pelos EUA. A análise de 2.128 famílias de patentes na plataforma The Lens Patents destaca EUA e China como principais inovadores, evidenciando intensa pesquisa e desenvolvimento em catalisadores eficientes e sustentáveis para SAF.

Palavras-chave: Catalisadores; Fischer-Tropsch; Análise Bibliométrica.

Abstract

This study explores the role of Fischer-Tropsch (FT) synthesis in producing sustainable aviation fuel (SAF), crucial for reducing CO₂ emissions in aviation. Invented by Franz Fischer and Hans Tropsch in the 1920s, FT synthesis transforms syngas, into liquid hydrocarbons using metal catalysts, mainly iron (Fe) or cobalt (Co). This process is vital for creating liquid fuels from coal, natural gas, or biomass, especially where petroleum is scarce or costly. The study includes a detailed bibliometric and patent analysis of catalysts in FT synthesis, focusing on SAF. A review of 1,236 articles from 2003 to 2024 in Scopus and Web of Science shows China leading in scientific publications, followed by the U.S., reflecting their heavy investment in sustainable aviation. Additionally, analysis of 2,128 patent families from The Lens Patents platform identifies the U.S. and China as major innovators; focus on more efficient and sustainable SAF catalysts to advance FT technology.

Keywords: Catalysts; Fischer-Tropsch; Bibliometric Analysis.

Áreas Tecnológicas: Prospecções. Catálise Heterogênea. Combustível de Aviação.



1 Introdução

Um importante foco de pesquisa nas áreas de química, engenharia e políticas ambientais é o desenvolvimento de tecnologias limpas que utilizem matérias-primas renováveis e que contribuam para a sustentabilidade.

O setor de aviação global é um dos principais responsáveis pelas emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) e a Organização de Aviação Civil Internacional (OACI), em conjunto com a Associação de Transporte Aéreo Internacional (ATAI), busca zerar as emissões de CO até o ano de 2050 (Bube *et al.*, 2024).

A conversão de gás de síntese (CO + H₂) em líquidos é conhecida como GTL (*Gas-To-Liquids*) e consiste na produção de hidrocarbonetos líquidos a partir da síntese de Fischer-Tropsch. O processo foi desenvolvido na década de 1920 pelos químicos alemães Franz Fischer e Hans Tropsch, que atuavam no Instituto Kaiser Wilhelm de Carvão, em Mülheim an der Ruhr, Alemanha. Em 1925, Fischer e Tropsch publicaram seus achados sobre a conversão de monóxido de carbono e hidrogênio em hidrocarbonetos líquidos na presença de um catalisador metálico, como ferro ou cobalto. Esse processo tornou-se particularmente significativo para a produção de combustíveis líquidos a partir de carvão, gás natural ou biomassa, especialmente em contextos em que o petróleo é escasso (Dry, 2002).

O processo foi usado pelos alemães durante a Segunda Guerra Mundial para produzir combustível de alta qualidade e tem sido operado em escala comercial desde a década de 1950 pela Sasol. O processo inicial, denominado “*Arge Process*”, utilizava baixas temperaturas (200-250°C), médias pressões (20-30 bar) e um reator de leito fixo (Clarke, 2000).

O gás de síntese (*syngas*) é produzido pela reforma do gás natural, carvão ou biomassa, purificado e depois convertido cataliticamente em hidrocarbonetos via Síntese de Fischer-Tropsch (FTS). Os produtos obtidos são melhorados (*upgrade*) para atingir os parâmetros físico-químicos desejados (Leckel, 2009).

Os catalisadores mais usados para a síntese de FT geralmente são à base de Fe, Co e Ru como fase ativa. Esses catalisadores permitem produzir longas cadeias de parafinas a partir do gás de síntese, que são melhorados mediante processos de hidrotratamento e/ou hidrocrackeamento para obter a faixa de combustíveis de aviação (ATF) ou *jet fuels* (Huber; Iborra; Corma, 2006; Dupain *et al.*, 2005). Além disso, o tamanho das partículas de Co em catalisadores para a síntese de Fischer Tropsch tem despertado grande interesse nos pesquisadores da área, com uma estreita correlação entre o tamanho de partícula de Co e a atividade intrínseca, medida pela frequência de conversão (TOF) (Richard *et al.*, 2013).

Catalisadores à base de Fe têm sido muito empregados em escala industrial por terem muitas vantagens, como baixa seletividade a metano, alta tolerância para enxofre e flexibilidade operacional, mas têm algumas desvantagens, pois operam em baixa e média temperaturas, possuem pouca atividade por grama de catalisador e alta seletividade de CO. No entanto, geralmente os catalisadores à base de Co apresentam alta seletividade para hidrocarbonetos de cadeias lineares longas, baixo custo do metal e estabilidade. Desenvolver novos catalisadores tem sido um desafio para melhorar o caminho de reação, além de obter combustível líquido e produtos líquidos de alto valor agregado que podem ser sintetizados diretamente via FTS (Hondo *et al.*, 2020). A transição de combustíveis fósseis tradicionais para biocombustíveis sustentáveis é

muito desejada para reduzir os níveis crescentes de CO no meio ambiente. Isso requer que os biocombustíveis estejam prontos para uso onde não haja efeitos adversos no desempenho e nas emissões após a substituição (Feser; Gupta, 2021).

Pesquisas recentes sobre catalisadores à base de cobalto focaram no *design* e na formulação de catalisadores, oferecem uma solução promissora com relação às melhorias, à seletividade e discutem uma nova abordagem para mitigar a desativação e aumentar o desempenho catalítico. Além disso, estudos sobre o assunto apontam as metodologias mais recentes no desenvolvimento de catalisadores para converter gás em líquidos (Suo *et al.*, 2022).

A indústria aeronáutica e o transporte aéreo têm um impacto considerável nas emissões globais de CO. Portanto, para reduzir as emissões de CO, é necessário produzir combustíveis derivados de biomassa que apresentem uma taxa de descarbonização mais rápida e, portanto, que sejam sustentáveis (Azevedo, 2020; Mendes, 2020). As empresas que buscam destaque no mercado precisam ter inovação e capacidade de antecipar qual será a tendência do produto, e seu principal objetivo é melhorar continuamente o produto que estão oferecendo. Por isso, um estudo prospectivo permite aprofundar o conhecimento sobre o comportamento que pode ter um determinado catalisador e chegar ao objetivo de obter um combustível direto a partir da rota de Fischer-Tropsch. Isso é essencial para os processos de investimento em inovação, captar recursos, permitindo que as empresas se adaptem às mudanças e tomem suas decisões da forma mais eficaz (Dos Reis; De Paula Pereira; Da Silva Rabêlo, 2024).

A literatura oferece um amplo estudo sobre os diferentes catalisadores empregados para obtenção de hidrocarbonetos líquidos (Gollakota; Thandlam; Shu, 2021; Keunecke *et al.*, 2024; Zhang *et al.*, 2024). Há muitos trabalhos na literatura sobre os diferentes catalisadores empregados na síntese de FT, mas poucas publicações científicas e patentes abordam a obtenção direta de *Sustainable Aviation Fuel (SAF)*, conhecido como bioquerosene de aviação (BioQAV). Com o fim de explorar a rota de Fischer-Tropsch para obter combustível de aviação de forma direta, o objetivo deste estudo consiste em empregar o método patentométrico e bibliométrico, a fim de investigar as tendências e fazer uma análise exploratória sobre as novas tecnologias. Trata-se uma análise que consiste na identificação dos principais países depositantes, dos principais titulares e de quais são os autores que mais publicam na área, identificando, assim, onde se encontra o foco de pesquisa e de inovação e a competitividade.

2 Metodologia

O trabalho se baseia em um estudo patentométrico e bibliométrico. Para a coleta de dados bibliográficos, utilizou-se o Portal de Periódicos da Capes, consultando as bases de dados Scopus (Elsevier) e Web of Science (Coleção Principal). Para mapear e conhecer o número de artigos e de patentes publicados, usou-se o filtro de seleção no período de 2003-2024 sobre rota catalítica de Fischer-Tropsch na produção de combustível sustentável de aviação. A escolha das bases de dados justifica-se pela sua cobertura e pela alta qualidade delas. Essas bases oferecem um vasto acervo de periódicos de relevância e de impacto, útil para uma análise de citações e profunda rede de conhecimento de pesquisas. São reconhecidas por suas análises abrangentes da produção científica global, combinação que garante uma pesquisa bibliométrica representativa e robusta.

O software VOSviewer (versão 1.6.19) foi usado com o objetivo de realizar o processamento e a análise por coautoria e concorrência, permitindo uma correlação entre os termos usados, além de uma análise comparativa dos gráficos e das figuras geradas.

Para realizar a pesquisa, foram usados os termos e as palavras-chave combinados em idioma inglês e português. Nas bases, foram utilizadas as combinações de termos e os operadores booleanos “AND” e “OR” para ter uma maior abrangência sobre o tema com essas combinações. Foram utilizados os termos “Fischer-Tropsch” AND “catalyst*” OR “catalisador*”, no campo título dos artigos e resumos, e “SAF” em todos os campos disponibilizados, como se apresenta na Tabela 1.

Tabela 1 – Busca nas bases de dados bibliográficas

BASES DE DADOS	TERMOS E/OU PALAVRAS-CHAVE			NÚMERO DE ARTIGOS
	FISCHER-TROPSCH	CATALYST* OR CATALISADOR*	SAF	
Web of Science	x			3.659
	x	x		2.219
Scopus	x	x	x	9
	x			3.956
	x	x		2.195
	x	x	x	7

Nota: x representa o uso do termo correspondente para o número de artigos encontrados; SAF: Sustainable Aviation Fuel.

Fonte: Elaborada pelos autores deste artigo (2024)

Para as buscas de patentes, foi utilizada a plataforma The Lens Patents, justificada por sua acessibilidade, como uma ferramenta gratuita, permitindo que pesquisadores de diversas instituições explorem dados de invenções e tenham acesso a informações de propriedade intelectual sem custos adicionais. Além disso, a plataforma tem passado por melhorias contínuas, ampliando suas funcionalidades e tornando-se uma fonte confiável e abrangente para a análise de patentes. A base de dados fornece informação de patentes depositadas em vários países e permite conhecer o número de patentes ativas depositadas desde 2003 até 2024. Usando as palavras-chave “Fischer-Tropsch” and “catalyst” em todos os campos disponíveis para ter maior abrangência nos resultados, pois com o uso das três palavras-chave ao mesmo tempo não gerava resultados representativos, sugerindo pouca abordagem da pesquisa com “SAF”, a busca foi feita em 30 de maio de 2024. Para a construção das figuras, o Lens disponibiliza uma série de gráficos, os dados foram tratados no programa Microsoft Excel.

A Tabela 2 apresenta uma estratégia que consistiu no uso dos códigos da Classificação Internacional de Patentes (CIP) combinada com a palavra-chave Fischer-Tropsch. As combinações dos códigos sobre o conjunto de patentes são apresentadas na legenda da Tabela 2, e a descrição dos respectivos códigos se encontram na Tabela 3.

As patentes podem abordar a rota de síntese de Fischer-Tropsch usando catalisadores para obter hidrocarbonetos líquidos. Para uma análise mais detalhada das patentes, foram utilizados vários códigos em grupo, identificando as patentes mais específicas como se apresentam na Tabela 3.

Tabela 2 – Escopo de estudo: termos usados e o número de patentes obtidas

CONJUNTOS	PALAVRAS-CHAVE E/OU CÓDIGO CIP						N. FAMÍLIAS DE PATENTES
	FISCHER-TROPSCH	C10G	C07C1/20	B01J23	B01J37	C10L1/04	
A	x						2.521
B	x	x					1.327
C	x	x	x				1.470
D	x	x	x	x			891
E	x	x	x	x	x		29
F	x	x	x	x	x	x	24

Nota: x representa os termos incluídos para obtenção do número de famílias de patentes encontradas. A=invenções que envolvem Fischer-Tropsch; B=Fischer-Tropsch com produção de misturas de hidrocarbonetos líquidos; C=Fischer-Tropsch com produção de misturas de hidrocarbonetos líquidos a partir de um ou mais compostos; D= Fischer-Tropsch com produção de misturas de hidrocarbonetos líquidos a partir de um ou mais compostos e usando catalisadores que contêm metais ou óxidos (ferro, cobalto e níquel); E= Fischer-Tropsch com produção de hidrocarbonetos líquidos a partir de um ou mais compostos com ativação de catalisadores; F= Fischer-Tropsch com produção de hidrocarbonetos líquidos usando catalisadores, caracterizados pela sua forma ou propriedades físicas.

Fonte: Adaptada de Da Mata Quintella, Rohweder e Quintella (2018)

Tabela 3 – Descrição dos Códigos Internacionais que foram utilizados

CÓDIGO	CLASSIFICAÇÃO
C10G	Produção de misturas de hidrocarbonetos líquidos
C07C1	Sínteses de hidrocarbonetos a partir de um ou mais compostos
B01J23	Os catalisadores que contenham metais ou óxidos, têm precedência
B01J37	Processos, em geral, de ativação de catalisadores
C10L1	Combustível carbonáceo líquidos

Fonte: Elaborada pelos autores deste artigo com base nos dados publicados por The Leans Patents (2024)

3 Resultados e Discussão

Os resultados obtidos na pesquisa sobre as patentes e os artigos foram analisados para obter o cenário da síntese de Fischer-Tropsch empregando catalisadores para obtenção de combustível sustentável de aviação. Nesse contexto, foram obtidas informações sobre os autores que mais publicam, o lugar de publicação, onde está tendo maior desenvolvimento do tema e os produtos envolvidos, além da evolução da tecnologia. Cabe ressaltar que, pelo fato de existir poucos estudos na literatura combinando as palavras-chave “Fischer-Tropsch”, “*catalyst*” and “SAF”, foi necessário para ter mais abrangência trabalhar com “Fischer-Tropsch” and “*catalyst*”.

3.1 Análise dos Documentos não Patentários e Patentários

A Figura 1 apresenta o comportamento em relação ao número de documentos publicados no decorrer dos anos, e neles estão presentes as famílias de patentes e os artigos com os termos “Fischer-Tropsch” e “*catalyst*” no campo título e resumo. Para a geração das figuras, não foi con-

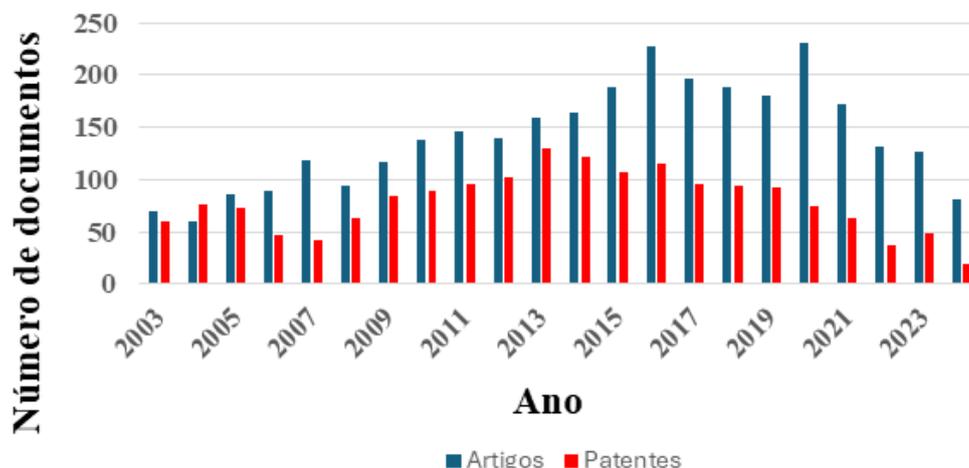
siderado o termo SAF, porque, como foi demonstrado na Tabela 1, existem poucos documentos usando os três termos ao mesmo tempo, acontecendo na busca de patentes também, sendo uma pesquisa promissora e também um desafio para o desenvolvimento de combustível sustentável. Para uma melhor análise das quantidades de patentes encontradas, entre concedidas e depositadas, foi aplicado um filtro utilizando apenas as patentes depositadas, a escolha apenas das patentes depositadas foi feita com o intuito de focar em inovações recentes que estão em processo de avaliação. As patentes concedidas já receberam proteção legal e podem não estar alinhadas com as tendências mais recentes.

No entanto, as depositadas abordam o estado atual de pesquisa e desenvolvimento tecnológico, destacando tecnologias emergentes que estão em fase de validação que podem dar uma direção ao campo estudado. Observou-se maior tendência pela publicação de artigos do que as patentes depositadas, um comportamento de crescimento de publicações de artigos e patentes de 2003 até 2016 incentivados pela mudança climática para ajudar a reduzir a emissão de carbono. As organizações financiadoras de pesquisa têm priorizado essa rota promissora, pois a síntese de Fischer-Tropsch tem sido investigada e empregada desde a Segunda Guerra Mundial para a produção de hidrocarbonetos, visando majoritariamente à fração gasolina. Portanto, a partir dos catalisadores convencionalmente empregados à base de Fe e/ou Co, é possível introduzir melhorias com vistas a maximizar o rendimento na fração SAF (Gollakota; Thandlam; Shu, 2021).

Após 2016, observa-se uma diminuição do volume de documentos que pode estar relacionada a diversos fatores, como a pandemia do SARS-CoV-2, que causou interrupção de pesquisas em diferentes partes do mundo, aumento do custo de plantas em escala de laboratório e em maior escala, custos de consumíveis e restrições de transporte e logística. Embora a rota de Fischer Tropsch seja promissora, há muitos desafios pela frente, já que é necessário um catalisador seletivo para a fração de líquidos para evitar formação de ceras e produtos não desejados. Isso pode ser um fator para que os pesquisadores tenham focado em outras rotas de síntese, que foram aprovadas para mistura com combustível de aviação convencional de acordo com as normas ASTM D7566 (ASTM Standards, 2022):

- a) Querosene parafínico sintético Fischer-Tropsch (FT-SPK);
- b) Querosene parafínico sintético Fischer-Tropsch com aromáticos (FTSPK/A);
- c) Ésteres e ácidos graxos hidroprocessados (HEFA);
- d) Hidroprocessamento de açúcares fermentados – isoparafinas sintéticas (HFS-SIP);
- e) Querosene parafínico sintético de jato de álcool (ATJ-SPK); e
- f) Coprocessamento.

Figura 1 – Número de publicações e de famílias de patentes de 2003-2024



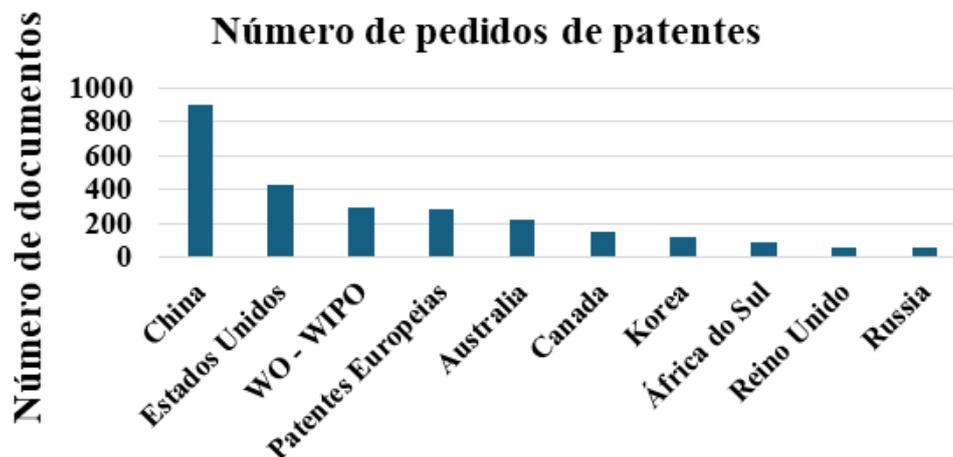
Fonte: Dados extraídos das bases de The Lens Patents (2024) e Scopus (2024)

3.2 Propriedade Intelectual por Países

A Figura 2 apresenta o número de famílias de patentes com pedidos de proteção nos 10 países de maior número de publicações. Para um total de 2.207 documentos, o maior número de famílias de patentes sobre Fischer Tropsch e catalisadores foi depositado na China, com 34,45% como escritório que recebeu maior volume de pedidos de patente, seguida pelos Estados Unidos, 16,45%, representando juntos 50,90% do total.

O alto número de depósito de pedidos de patentes nesses países ao longo dos anos se deve aos desenvolvimentos e ao maior crescimento, especialmente na China, da luta por mitigar os impactos ambientais, procurar a inovação e investimento na sustentabilidade, o que indica o alto número de publicações e de depósitos de pedidos de patentes. Além disso, a China constitui o maior mercado consumidor do mundo e vem sendo foco de comércio mundial, estimulando a proteção das patentes na busca de vantagens competitivas (Dos Reis; De Paula Pereira; Da Silva Rabêlo, 2024).

Figura 2 – Número de pedidos de patentes por país

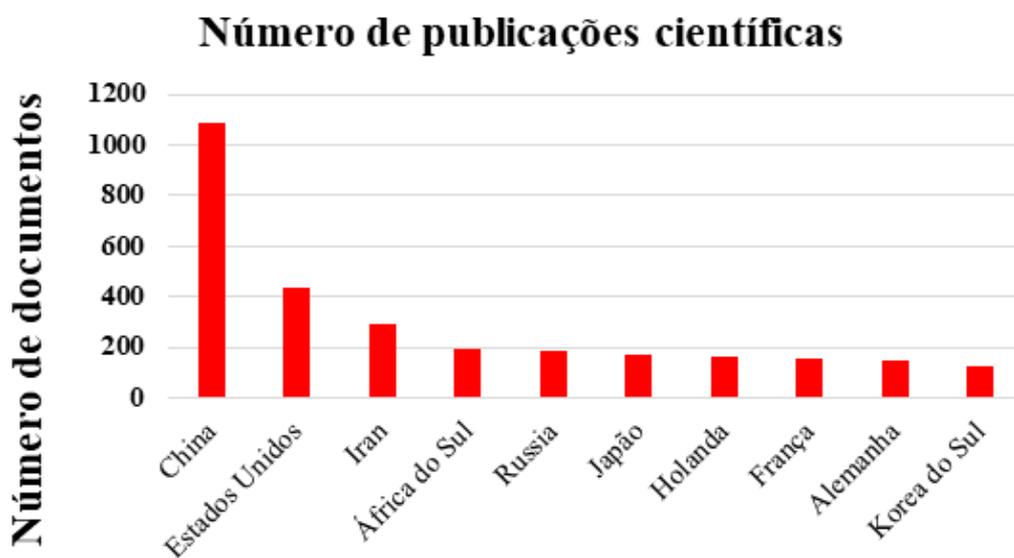


Nota: *WO-(WIPO) – Organização Mundial da Propriedade Intelectual.

Fonte: Dados da base The Lens Patents (2024)

A Figura 3 representa o número de publicações científicas sobre a temática dos primeiros 10 países que mais publicaram no mundo de 2003 até 2024, sendo China e Estados Unidos os países que mais têm publicações, com 51,54% aproximadamente de todas as publicações. O Brasil está na 16ª posição e conta com 2,10% das publicações no mundo. A China e os EUA dominam as publicações científicas na área, contribuído com mais da metade das publicações, o que reflete um papel central desses países em pesquisa e inovação, maior investimento em pesquisa, com apoio tanto do governo quanto do setor privado, propício para a inovação. O Brasil está em uma posição menos destacada, embora com uma participação significativa, está muito longe das potências científicas, sugerindo a necessidade de maior investimento em pesquisa para melhorar o cenário. O país enfrenta desafios com o financiamento de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) e se vê afetado pelos cortes, limitando sua capacidade de produção científica. Existe uma dependência significativa de recursos públicos, com menor desenvolvimento no setor privado em pesquisa, e a infraestrutura científica, embora esteja em crescimento, ainda precisa melhorar para competir no cenário atual com a China e os EUA. Além disso, a burocracia, as travas institucionais, a fuga de cérebros para nações com melhores condições de trabalho e financiamento e a pouca gestão de representantes do governo dificultam o andamento de projetos de pesquisa e a colaboração internacional, limitando a agilidade e a capacidade do Brasil para acompanhar as inovações científicas globais.

Figura 3 – Número de publicações científicas por país



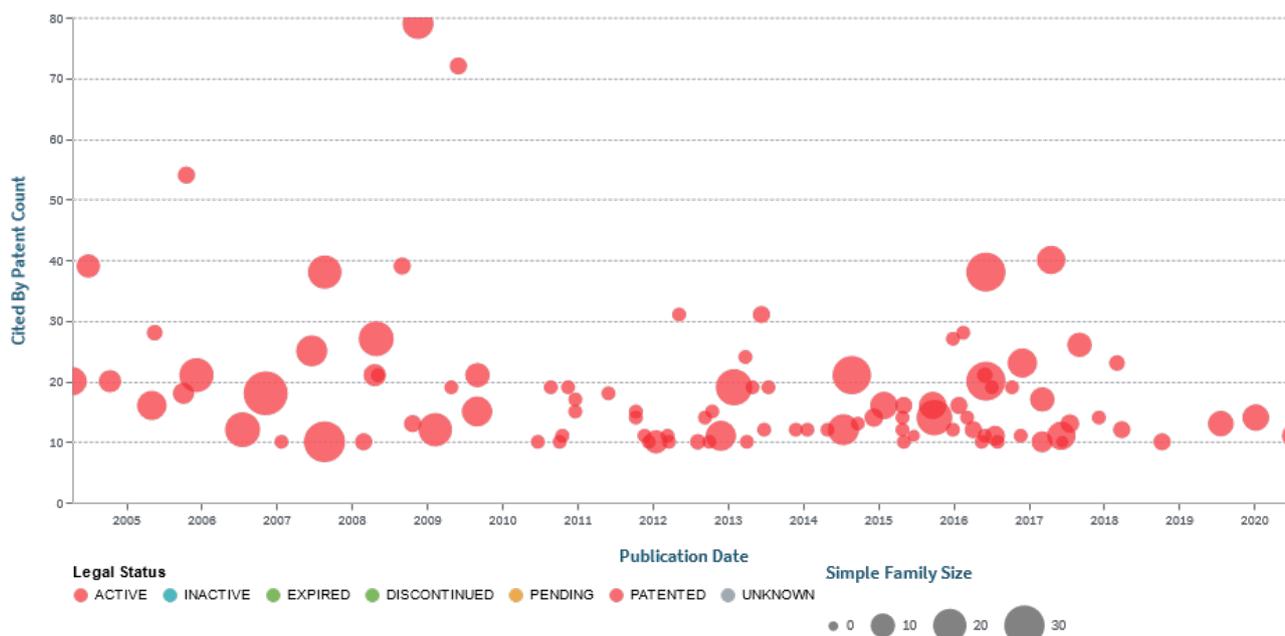
Fonte: Elaborada com base nas buscas em Scopus (2024)

3.3 Análise de Concorrência e Citações dos Documentos

Na Figura 4, observa-se o número de citações de uma família de patentes, o tamanho da família de patentes e o *status* legal das patentes, e foram escolhidas as patentes ativas. Entre as invenções, destacam-se: “Preparation of titânia and cobalto aluminate catalyst supports and their use in Fischer-Tropsch synthesis” (Mauldin; Burns, 2007) e “Fischer-Tropsch synthesis using microchannel technology and novel catalyst and microchannel reactor” (Yong et al., 2006), ambas com 18 citações. “Slurry bed Fischer-Tropsch catalyst with sílica/alumina structural promoters”

(Duvenhage; Demirel, 2014), com 24 citações; “Cobalt-based catalyst for Fischer-Tropsch synthesis” (Diehl *et al.*, 2011) com 18 citações; “Mesoporous material coated cobalt-based fischer-tropsch synthesis catalyst and preparation method thereof” (Shasha *et al.*, 2014), com 12 citações; e com 79 citações “High surface area, small crystallite size catalyst for Fischer-Tropsch synthesis” (Hu; Loi; O’Brien, 2008), sendo esta a de maior impacto.

Figura 4 – Número de citações por família de patentes, considerando o *status* do pedido no decorrer dos anos



Fonte: The Lens Patent (2024)

As patentes mais citadas na área de Fischer-Tropsch são de significativa contribuição para algumas invenções relacionadas ao avanço científico-tecnológico na área de catálise heterogênea. O foco nessa área de concentração de citações revela a importância dessas inovações específicas na tecnologia da síntese de Fischer-Tropsch, trazendo um impacto crucial em otimizar o processo catalítico, a frequência de citações dessas patentes remarca não apenas a importância científica, mas sugere seu potencial para influenciar futuras pesquisas e aplicações industriais.

A Figura 5 foi gerada com o *software* VOSviewer (versão 1.6.19) e apresenta uma análise da coocorrência das palavras-chave usadas na pesquisa de catalisadores empregados na síntese de Fischer-Tropsch, usando as bases de dados de Scopus (Elsevier), para um total de 939 palavras-chave, e formando nove *clusters*. O *cluster* com maior densidade é o verde (segundo *cluster*), indicando que “Fischer-Tropsch synthesis” é o termo mais usado, “Fischer-Tropsch synthesis”, ligado aos termos “fixed bed reactor”, “chemical reaction”, “paraffins”, “kinetics”. O vermelho, primeiro *cluster*, está focado nos termos “iron”, “catalytic performance”, que está sendo contornado de “carbides”, “catalyst”, “olefins”, “light olefins”. O *cluster* 3, o azul, tem “Cobalto” como termo de maior densidade sendo o que mais aparece o “Cobalto”, com conexões para “X-ray difraccion”, “impregnation”, “catalyst deactivation”, “pore size”, “calcination”. O *cluster* 4, o amarelo, tem o termo mais citado “particule size” com relação aos termos “carbon”, “carbon nanotubes”, “nanoparticules”, “nanocatalyst”. O *cluster* roxo é o quinto, sendo o termo mais citado “catalyst”, vinculado fortemente a “fischer-tropsch synthesis”, “re-

leves. As conexões de “Cobalt”, “X-ray diffraction”, “impregnation”, “catalyst deactivation”, “pore size” e “calcination” revelam uma ênfase nas técnicas de caracterização e preparação desses catalisadores. Os termos “catalyst deactivation”, “pore size” e “calcination” têm relação com o desempenho a longo prazo e com a eficácia dos catalisadores.

Os termos do *cluster 4* “particle size”, fortemente relacionado a conceitos como “carbono”, “carbon nanotubes”, “nanoparticles” e “nanocatalyst”, sugerem que a pesquisa neste *cluster* está focada no uso de materiais à base de carbono em escala manométrica e são estudados como suportes catalíticos que podem melhorar a atividade, a seletividade e a estabilidade no processo Fischer-Tropsch.

O *cluster 5* tem como termo principal “catalyst”, vinculado de forma significativa a “Fischer-Tropsch synthesis”, “reduction”, “synthesis” e “hydrocarbon”, o que reflete a importância dos catalisadores na síntese Fischer-Tropsch, com um foco particular no processo de redução dos catalisadores e na síntese de hidrocarbonetos, como os catalisadores que influenciam diretamente na eficiência da conversão de gases em hidrocarbonetos líquidos.

O termo “Fischer-Tropsch catalyst” presente no *cluster 6* está ligado a termos como “catalyst deactivation”, “sintering”, “co-hydrogenation” e “manganese”, focando na desativação e na sinterização, que são problemas estudados para compreender como a aglomeração das partículas sob altas temperaturas pode reduzir a atividade do catalisador ao longo do tempo e como o manganês pode melhorar a resistência do catalisador à desativação.

O *cluster 7* revela a importância do uso de suportes como zeólitos e óxido de alumínio para influenciar na seletividade a hidrocarbonetos, em particular os zeólitos favorecem a formação de hidrocarbonetos com cadeias específicas. Os termos usados no *cluster 8* sugerem o uso de técnicas avançadas para examinar a morfologia dos catalisadores como Microscopia eletrônica de transmissão (TEM) e Microscopia eletrônica de varredura (SEM), e o termo “titanium dioxide” indica que o dióxido de titânio está sendo investigado como suporte ou componente ativo nos catalisadores estudados.

Por fim, o *cluster 9* “Aluminium” e “hydrogen”, com forte interação com “ruthenium”, “platinum”, “XANES”, “EXAFES”, “TPR”, “in-situ XRD”, “GTL”, revela o uso de catalisadores a base de metais nobres como rutênio e platina, a caracterização dos catalisadores com técnicas avançadas como “XANES” (*X-ray Absorption Near Edge Structure*), “EXAFS” (*Extended X-ray Absorption Fine Structure*), para investigar a estrutura eletrônica e a coordenação dos metais no catalisador, Redução Termoprogramada de Hidrogênio (TPR) para determinar a temperatura de redução do catalisador e Difratomia de Raios-X para determinar as mudanças do material em tempo real.

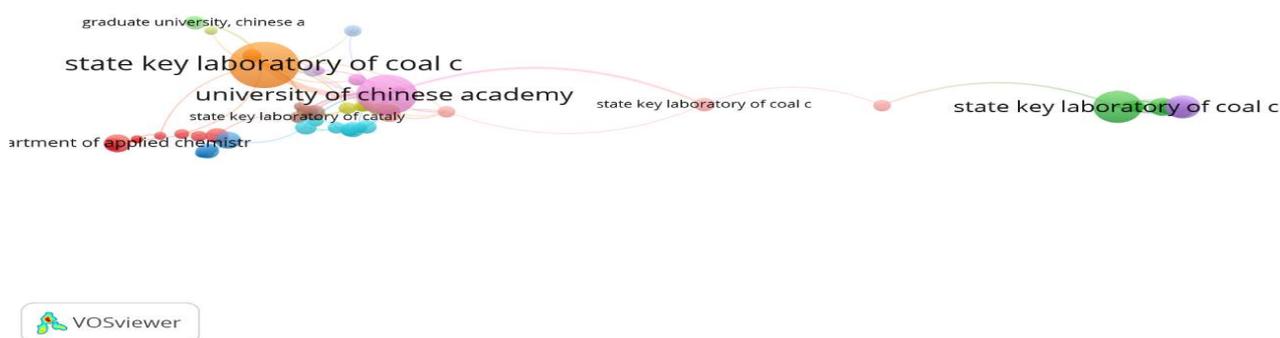
3.4 Análise de Coautorias e Instituições

A Figura 6 apresenta uma análise bibliométrica sobre a relação e as colaborações entre os coautores ligados às diferentes instituições. O mapeamento foi realizado com 3.364 instituições, e a quantidade mínima de documentos por organizações foram três para determinar a relação que existe e as colaborações. Pode-se observar nove *clusters* de relações, com baixa relação entre as instituições de maneira geral, e só foram encontradas 73 instituições com relações entre elas. Portanto, observa-se a falta de uma interação robusta entre as diversas instituições globais na

resolução de problemas, na realização de pesquisas e na colaboração para o desenvolvimento científico e tecnológico nessa área.

O State Key Laboratory of Coal está representando o *cluster* com maior força e, em segundo lugar e com inter-relação, o *cluster* roxo com a University of Chinese Academy, tendo uma estreita colaboração com a Graduate University Chinese, Department of Applied Chemistry, Key Laboratory of Biofuels, Key Laboratory of Renewable, Shanghai Synchrotron Radiation. O *cluster* verde, que está representado pelo Institute of Coal Chemistry, tem menos interação com as outras instituições.

Figura 6 – Coautoria e relações entre instituições de pesquisa



Fonte: Elaborada com base em VOSviewer (2023)

O número de publicações científicas é liderado, em primeiro lugar pela China, seguida pelos EUA, e tem como reflexo as políticas desenvolvidas, o conjunto de inovação e o desenvolvimento sustentável, indicando alguma partida tecnológica que se torna ambiciosa para representar a primeira linha no mercado de combustíveis sustentáveis com um foco significativo em catalisadores eficientes e sustentáveis para SAF. Cabe considerar que outros países também podem estar desenvolvendo pesquisas relevantes, mas têm menor visibilidade em bases de dados internacionais, o que pode indicar a existência de uma barreira para a entrada de novos atores nesse campo, especialmente de países em desenvolvimento.

O desenvolvimento de catalisadores avançados para a síntese FT é contado como um dos principais desafios identificados neste artigo. Os catalisadores à base de ferro (Fe) e cobalto (Co) são os mais utilizados, mas eles têm vantagens e desvantagens específicas que podem ir desde alta seletividade para hidrocarbonetos de cadeias lineares longas até estabilidade dos catalisadores de Co que contrastam com a baixa seletividade a metano e alta tolerância para enxofre dos catalisadores de Fe. A busca por catalisadores que possam combinar as vantagens de ambos os materiais é uma prática promissora de pesquisa e o principal desafio dos pesquisadores.

É imperativa a busca pela transição de combustíveis fósseis para biocombustíveis sustentáveis para reduzir as emissões de CO₂. Desenvolvimentos de catalisadores avançados com alta seletividade a hidrocarbonetos podem acelerar essa transição, mas não se pode deixar de considerar o ciclo de vida completo dos biocombustíveis. Um estudo adicional sobre o impacto ambiental da produção e do uso de catalisadores será importante para garantir que as soluções propostas pelos pesquisadores sejam realmente sustentáveis.

Novos materiais catalíticos têm sido desenvolvidos, mas há ainda um longo caminho pela frente, já que a otimização das condições de reação e a obtenção de um material avançado são essenciais para melhorar a eficiência e a sustentabilidade do processo de FT. Os cientistas têm focado recentemente na utilização de catalisadores suportados em materiais mesoporosos como as peneiras moleculares e zeólitos hierárquicos, além de materiais híbridos, sendo que estes oferecem alta área superficial e possibilitam uma melhor dispersão dos metais ativos. Além disso, a superfície dos catalisadores pode ser modificada com promotores, como cério e lantânio, que têm mostrado potencial para aumentar a atividade catalítica e a seletividade para produtos desejados.

Outro ponto importante que não se pode deixar passar é que o impacto ambiental do processo FT também está relacionado à origem do gás de síntese. Tradicionalmente, pode ser produzido da reforma de gás natural ou gasificação de carvão, processos que emitem CO₂. No entanto, existem outras alternativas mais sustentáveis que estão sendo exploradas, como a produção de gás de síntese a partir de biomassa ou resíduos orgânicos. Essas abordagens têm o potencial de diminuir significativamente a pegada de carbono na síntese FT, tornando o SAF uma opção mais viável e ecológica.

Para se chegar ao objetivo de mitigar as emissões de Gás de Efeito Estufa (GEE) na indústria aeronáutica com o uso de combustível sustentável a partir de fontes renováveis, é necessário que os pesquisadores da área encontrem a formulação do catalisador com seletividade e conversão desejada, mas, para isso, deve-se fomentar uma pesquisa interdisciplinar com colaboração de químicos, engenheiros e especialistas em políticas ambientais, além de países que colaborem para desenvolver soluções integradas. A pesquisa interdisciplinar gera o desenvolvimento de novos catalisadores e processos que sejam não apenas eficientes, mas também economicamente viáveis e ambientalmente sustentáveis. Os investimentos promovem a pesquisa mais viável, trazendo programas de financiamento, incentivos fiscais e regulamentações favoráveis que estimulam a inovação e a adoção de tecnologias sustentáveis no setor de aviação.

4 Considerações Finais

Este estudo analisou a evolução e o estado atual da pesquisa e desenvolvimento de catalisadores para a síntese de Fischer-Tropsch (FTS), visando à produção de bioquerosene de aviação (SAF). A análise bibliométrica mostrou um aumento significativo nas publicações científicas desde 2003, com destaque para China e Estados Unidos como líderes em produção acadêmica e também como escritórios que mais recebem pedidos de patentes, refletindo seus investimentos em pesquisa e inovação, o que sugere a presença de uma infraestrutura robusta como parques tecnológicos na área de pesquisa estudada.

Uns dos principais desafios na FTS inclui a necessidade de catalisadores mais seletivos e eficientes, adicionado à viabilidade econômica em larga escala. As lagunas de estudos, como a variabilidade nos resultados sobre a eficiência dos catalisadores, indicam a urgência de padronização metodológica. A análise também evidenciou lacunas significativas, especialmente em relação à transição da FTS para a produção industrial de SAF e em relação à avaliação abrangente do impacto ambiental.

Para superar os desafios, futuras pesquisas devem focar no desenvolvimento de novos materiais catalíticos e correlacionar a FTS com outras tecnologias, por exemplo, a captura de carbono e o processamento de biomassa para posterior hidrogenação do CO. É vital realizar análises de viabilidade econômica e de sustentabilidade logrando a transição para a produção de combustíveis de aviação sustentáveis. A produção de SAF representa uma área de pesquisa importante e muito desafiadora para o futuro da aviação sustentável e busca diminuir as emissões de gás de efeito estufa proveniente da combustão das aeronaves. Superar os desafios técnicos e econômicos por meio de inovações e de colaborações será essencial para a transição energética entre os países mais desenvolvidos em colaboração com os que emergem no desenvolvimento e os menos desenvolvidos.

5 Perspectivas Futuras

O processo de Fischer-Tropsch (FT) apresenta um futuro promissor na produção de combustíveis sustentáveis, especialmente o bioquerosene de aviação (SAF), já que reduzir as emissões de CO na indústria de aviação é uma das principais preocupações para o mundo. Com o compromisso global de reduzir as emissões de CO na aviação até 2050, a pesquisa focada em catalisadores mais eficientes e em processos otimizados é essencial. Futuras direções incluem o desenvolvimento de catalisadores que não apenas aumentem a eficiência e a seletividade para hidrocarbonetos desejados, mas que também sejam economicamente viáveis e sustentáveis. O avanço em catalisadores baseados em ferro e cobalto continua a ser um campo crucial nos esforços para minimizar a formação de subprodutos indesejados e melhorar a durabilidade dos catalisadores. Adicionalmente, a integração da biomassa como matéria-prima pode tornar o processo ambientalmente amigável e sustentável. Tecnologias emergentes, como a catálise heterogênea avançada e a nanotecnologia, prometem revolucionar a eficiência dos processos de FT. Portanto, a combinação de inovação em catálise com políticas de suporte pode acelerar a transição para combustíveis de aviação mais limpos e sustentáveis.

Referências

ASTM STANDARDS. ASTM D7566. **Specification for Aviation Turbine Fuels Containing Synthesized Hydrocarbons**. DEF STAN 91-91: UK Defence Standard; MIL-DTL-83133 J: Turbine fuel, aviation, kerosene-type, JP-8 (NATO F34), NATO F-35, and JP-8 + 100 (NATO F-37). 2022.

AZEVEDO, J. P. **Emissão de gases de efeito estufa pela aviação civil**: biocombustíveis no Brasil. 2020. 50p. Monografia (Bacharelado em Ciências Aeronáuticas) – Universidade do Sul de Santa Catarina, Itajaí, 2020.

BUBE, S. *et al.* Kerosene production from power-based syngas – A technical comparison of the Fischer-Tropsch and methanol pathway. **Fuel**, [s.l.], v. 366, p. 131269, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.131269>.

CLARKE, S. C. **Managing The Molecule**: refining in the Next Millennium. [S.l.: s.n.], 2000.

DA MATA QUINTELLA, Guilherme; ROHWEDER, Mayla; QUINTELLA, Cristina M. Estudo Prospectivo das Patentes de Resveratrol na Indústria Farmacêutica. **Cadernos de Prospecção**, Salvador, v. 11, n. 4, p. 1.110-1.110, jul. 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.9771/cp.v11i4.27156>.

DIEHL, F. *et al.* **Cobalt-based catalyst for Fischer-Tropsch synthesis**. U.S. Patent n. 8,071,655. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office, 6 Dic. 2011.

DOS REIS, Rafael Miranda Carvalho; DE PAULA PEREIRA, Neila; DA SILVA RABÊLO, Olivian. Estudo Prospectivo sobre o Potencial uso do Cacau no Setor de Cosméticos: análise das tendências atuais para PD&I. **Cadernos de Prospecção**, Salvador, v. 17, n. 2, p. 639-653, abril a junho de 2024. DOI: <https://doi.org/10.9771/cp.v17i2.56025>.

DRY, M. E. The Fischer-Tropsch process: 1950-2000. **Catalysis Today**, [s.l.], v. 71, n. 3-4, p. 227-241, jan. 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0920-5861\(01\)00453-9](https://doi.org/10.1016/S0920-5861(01)00453-9).

DUPAIN, X. *et al.* Are Fischer-Tropsch waxes good feedstocks for fluid catalytic cracking units? **Catalysis Today**, [s.l.], v. 106, n. 1-4, p. 288-292, oct. 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2005.07.148>.

DUVENHAGE, Dawid J.; DEMIREL, Belma. **Slurry bed fischer-tropsch catalysts with silica/alumina structural promoters**. U.S. Patent n. 8,791,041, 29 Jul. 2014.

FESER, J.; GUPTA, A. Performance and emissions of drop-in aviation biofuels in a lab-scale gas turbine combustor. **Journal of Energy Resources Technology**, [s.l.], v. 143, n. 4, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4048243>.

GOLLAKOTA, A. R.; THANDLAM, A. K.; SHU, C. M. Biomass to bio jet fuels: a take off to the aviation industry. In: GOLLAKOTA, A. R.; THANDLAM, A. K.; SHU, C. M. **Liquid Biofuels: Fundamentals, Characterization, and Applications**. 2021. p. 183-213. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119793038.ch6>.

HONDO, E. *et al.* Direct Production of Hydrocarbons by Fischer-Tropsch Synthesis Using Newly Designed Catalysts. **Journal of the Japan Petroleum Institute**, [s.l.], v. 63, n. 5, p. 239-247, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1627/jpi.63.23>.

HU, X. D.; LOI, Patrick J.; O'BRIEN, Robert J. **High surface area, small crystallite size catalyst for Fischer-Tropsch synthesis**. U.S. Patent n. 7,452,844, 18 Nov. 2008.

HUBER, G. W.; IBORRA, S.; CORMA, A. Synthesis of transportation fuels from biomass: chemistry, catalysts, and engineering. **Chemical Reviews**, [s.l.], v. 106, n. 9, p. 4.044-4.098, jun. 2006. DOI: <https://doi.org/10.1021/cr068360d>.

KEUNECKE, A. *et al.* Insights into Fischer – Tropsch catalysis: current perspectives, mechanisms, and emerging trends in energy research. **Frontiers in Energy Research**, [s.l.], v. 12, p. 1344179, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2024.1344179>.

LECKEL, D. Diesel production from Fischer Tropsch: the past, the present, and new concepts. **Energy Fuels**, [s.l.], v. 23, n. 5, p. 2.342-2.358, abr. 2009. DOI: <https://doi.org/10.1021/ef900064c>.

MAULDIN, Charles H.; BURNS, Louis F. **Preparation of titania and cobalt aluminate catalyst supports and their use in Fischer-Tropsch synthesis**. U.S. Patent n. 7,253,136, 7 Ago. 2007.

MENDES, H. D. V. **Viabilidade dos compromissos brasileiros de redução de emissões de gases de efeito estufa: uma análise dos períodos pré e pós-2020**. 2020. 164p. Dissertação (Mestrado) – Centro de Desenvolvimento Sustentável, Universidade de Brasília, Brasília, Brasília, DF, 2020.

RICHARD, L. A. *et al.* Fischer-Tropsch performance correlated to catalyst structure: Trends in activity and stability for a silica-supported cobalt catalyst. **Applied Catalysis A: General**, [s.l.], v. 464-465, p. 200-206, ago. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2013.05.047>.

SCOPUS (Elsevier). **Busca do Scopus**. 2024. Disponível em: <https://www.elsevier.com/pt-br/products/scopus/search>. Acesso em: 2 jan. 2024.

SHASHA, R. *et al.* **Mesoporous material coated cobalt-based fischer-tropsch synthesis catalyst and preparation method thereof**. CN 103920496 A, 16 de jul. 2014.

SUO, Y. *et al.* Recent advances in cobalt-based Fischer-Tropsch synthesis catalysts. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, [s.l.], v. 117, p. 304-318, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2022.08.026>.

THE LEANS PATENTS. **Página de busca**. 2024. Disponível em: <https://www.lens.org/>. Acesso em: 2 jan. 2024.

VOSVIEWER. **Bem-vindo ao VOSviewer**: versão 1.6.20. 2023. Disponível em: <https://www.vosviewer.com/>. Acesso em: 2 jan. 2024.

YONG, W. *et al.* **Fischer-Tropsch synthesis using microchannel technology and novel catalyst and microchannel reactor**. US 2006/0251552 A1, 09 de Sep. 2006.

ZHANG, Y. *et al.* ZSM-5-Promoted Co-Based Light-Assisted Thermocatalytic Fischer-Tropsch Synthesis Catalyst for Production of Liquid Fuel. **Energy Technology**, [s.l.], v. 2301280, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1002/ente.202301280>.

Sobre os Autores

Jorge Arce Castro

E-mail: jorgecastro@ufba.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6957-5839>

Bacharel em Química pela Universidade de Oriente, Cuba, em 2020.

Endereço profissional: Programa de Pós-graduação em Energia e Ambiente, Centro Interdisciplinar de Energia e Ambiente, Universidade Federal da Bahia, Rua Barão de Jeremoabo, s/n, Câmpus de Ondina, Salvador, BA. CEP: 40170-115. Laboratório de Catálises e Materiais, Departamento de Química Geral e Inorgânica, Universidade Federal da Bahia, Rua Barão de Jeremoabo, n. 147, Câmpus de Ondina, Federação, Salvador, BA. CEP: 40170-115.

Artur José Santos Mascarenhas

E-mail: artur@ufba.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1757-5372>

Doutor em Química pela Universidade Estadual de Campinas em 2004.

Endereço profissional: Programa de Pós-graduação em Energia e Ambiente, Centro Interdisciplinar de Energia e Ambiente, Universidade Federal da Bahia, Rua Barão de Jeremoabo, s/n, Câmpus de Ondina, Salvador, BA. CEP: 40170-115. Laboratório de Catálises e Materiais, Departamento de Química Geral e Inorgânica, Universidade Federal da Bahia, Rua Barão de Jeremoabo, n. 147, Câmpus de Ondina, Federação, Salvador, BA. CEP: 40170-115.

Silvio Alexandre Beisl Vieira de Melo

E-mail: sabvm@ufba.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8617-3724>

Doutor em Engenharia Química pela Universidade Federal de Rio de Janeiro em 1997.

Endereço profissional: Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Energia e Ambiente, Centro Interdisciplinar de Energia e Ambiente, Universidade Federal da Bahia, Rua Barão de Jeremoabo, s/n, Câmpus de Ondina, Salvador, BA. CEP: 40170-115.

Yanier Sánchez Hechavarría

E-mail: yanier.sanchez@ufba.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9767-2799>

Doutor em Ciências da Engenharia Mecânica pela Universidade de Oriente, Cuba, em 2018.

Endereço profissional: Laboratório de Catálises e Materiais, Departamento de Química Geral e Inorgânica, Universidade Federal da Bahia, Rua Barão de Jeremoabo, n. 147, Câmpus de Ondina, Federação, Salvador, BA. CEP: 40170-115.