

APPLICATION OF MANGANESE-BASED OXIDES AS OXYGEN CARRIERS IN
CHEMICAL LOOPING PROCESSES: A BIBLIOMETRIC ANALYSIS

A. B. SILVA*, D. M. A. MELO, R. L. B. A. MEDEIROS, R. A. B. NASCIMENTO SANTIAGO, L. M. SANTOS

Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Brasil

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1617-9896>*arivonaldo.quimica@gmail.com*

Submitted April 18, 2024 - Accepted July 2, 2024

DOI: 10pts.15628/holos.2024.17226

ABSTRACT

This article describes a general study of manganese-based oxygen carriers (OCs) in chemical looping (CL) processes between 2006 and 2023 through a careful bibliometric analysis. This was achieved through the selection of scientific articles and checking bibliometric parameters, highlighting the main challenges and the current state of this area of research. Using keywords, 426 documents were found on the Web of Science database and 65 of them were selected using the ProKnow-C method. Analysis of the main articles

indicates that these materials have decreased friction rates and a low tendency to agglomerate in reactors with continuous fluidized beds. Furthermore, this study informs the possible optimization of the physicochemical properties of oxygen carriers, with emphasis on the oxygen transport capacity, reactivity, and friction rate. In addition, this research highlighted the great potential of synthetic manganese-based OCs for applications in CL processes.

KEYWORDS: Oxygen carrier; Manganese; Bibliometric analysis; Chemical Looping; Chemical Looping Combustion

APLICAÇÃO DE ÓXIDOS À BASE DE MANGANÊS COMO TRANSPORTADORES DE
OXIGÊNIO EM PROCESSOS DE RECIRCULAÇÃO QUÍMICA: UMA ANÁLISE
BIBLIOMÉTRICA

RESUMO

Este artigo descreve um estudo geral dos transportadores de oxigênio (TOs) à base de manganês em processos de recirculação química (RQ) entre 2006 e 2023 através de uma análise bibliométrica cuidadosa. Para tal, foram selecionados artigos científicos e verificados parâmetros bibliométricos, destacando os principais desafios e o estado atual desta área de investigação. Através de palavras-chave, foram encontrados 426 documentos na Web of Science e 65 foram selecionados através do método ProKnow-C. A

análise dos principais artigos indica que esses materiais apresentam taxas de atrito reduzidas e baixa tendência à aglomeração em reatores de leito fluidizado contínuos. Além disso, o estudo informa sobre uma possível otimização das propriedades físico-químicas dos transportadores de oxigênio, com destaque para a capacidade de transporte de oxigênio, a reatividade e a taxa de atrito. Além disso, esta pesquisa destacou o grande potencial dos TOs sintéticos à base de manganês para aplicações em processos de RQ.

Palavras chave: Transportador de oxigênio; Manganês; Análise bibliométrica; Recirculação Química; Combustão por Recirculação Química

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, as preocupações com as mudanças climáticas se intensificaram devido ao rápido crescimento do uso excessivo de combustíveis fósseis para fins industriais, energéticos e de transporte. Isso é causado pela emissão antropogênica de gases de efeito estufa, principalmente dióxido de carbono, aumentando a temperatura do planeta Terra e causando impactos catastróficos, resultando em secas mais intensas, chuvas muito fortes, tsunamis e furacões (Nandy et al., 2016; Tutuncu, 2021).

Por ter as maiores emissões antropogênicas entre os gases de efeito estufa (até 76%) e permanecer na atmosfera do nosso planeta por longos períodos, o dióxido de carbono é a maior causa das mudanças climáticas (Adánez et al., 2012; Archer, 2005; IPCC, 2014; Nunes, 2023). Para reduzir essas emissões, são necessárias medidas mais rigorosas para garantir que o limite de emissões (450 ppm) não seja ultrapassado (Adánez et al., 2012; Nandy et al., 2016). Os países que fazem parte da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC) assinaram o Acordo de Paris em 2015, para estabelecer várias medidas para reduzir as emissões antropogênicas de CO₂ (MSTI, 2015).

Uma das soluções é o investimento e a adoção de energias renováveis (solar, eólica, hídrica, nuclear, biocombustíveis, entre outras), porém sua aplicação em larga escala apresenta um custo muito alto, dificultando sua implementação com segurança energética. Assim, os combustíveis fósseis continuam sendo os mais utilizados por serem mais baratos, exigindo a aplicação de novas tecnologias para capturar e armazenar carbono (CAC) nos processos de produção de energia e H₂.

As tecnologias convencionais de CAC se enquadram em três categorias: pré-combustão, pós-combustão e combustão de oxi-combustível. No entanto, elas têm altos custos econômicos e sofrem penalidades energéticas devido aos processos usados para separar o dióxido de carbono de outros gases de combustão (IPCC, 2005; Li et al., 2017). Para resolver esses problemas, surgiram as tecnologias de RQ. Elas utilizam um óxido metálico, chamado de transportador de oxigênio, para reagir com o combustível e realizar a combustão, sem a necessidade de contato entre o combustível e o ar atmosférico, minimizando os custos econômicos e as penalidades energéticas (Li et al., 2017; Mendiara et al., 2014; Nascimento, 2019).

As tecnologias de RQ têm dois objetivos: combustão e produção de hidrogênio (Li et al., 2017). A combustão por recirculação química (CRQ), a combustão por recirculação química com gaseificação in situ (iG-CRQ) e a combustão por recirculação química com desacoplamento de oxigênio (CRQDO) são geralmente usadas para combustão (Ksepko & Lysowski, 2021; Li et al., 2017). Para produzir hidrogênio, é usada a tecnologia de reforma por recirculação química (RRQ), que realiza a reforma catalítica para produzir um gás de síntese por meio de um processo de combustão parcial; o H₂ é separado dos outros gases em uma unidade WGS+PSA (Adánez et al., 2012). O hidrogênio pode ser usado para geração de energia e como um agregado intermediário para produzir metanol, amônia e em processos petroquímicos (Adánez et al., 2012; Li et al., 2017).

Portanto, para que os sistemas RQ funcionem de forma mais eficaz, é muito importante escolher um bom TO. Ele pode ser sintético, que é um óxido metálico geralmente baseado em níquel, cobalto, cobre, manganês ou ferro como fase ativa, suportado em um material inerte, como Al₂O₃, MgAl₂O₄, SiO₂, TiO₂ ou ZrO₂; ou um mineral. Assim, o transportador de oxigênio deve ter boa reatividade com o combustível, capacidade de transporte de oxigênio, resistência ao atrito, resistência mecânica, baixa deposição de carbono, alto ponto de fusão, baixo custo e ser

ecologicamente correto (Adáñez *et al.*, 2012; Li *et al.*, 2017; Nandy *et al.*, 2016; Rydén *et al.*, 2010). No entanto, os TOs baseados em níquel, cobalto e cobre têm um alto custo econômico, e os dois primeiros podem gerar compostos tóxicos, o que é o principal problema para aplicá-los em larga escala (Adáñez *et al.*, 2012; Costa, 2019; *Mineral commodity summaries*, 2022; Nascimento, 2019). No entanto, os TOs baseados em manganês e ferro são muito promissores, pois são de baixo custo e não são tóxicos e apresentam um alto ponto de fusão, alta reatividade com diferentes combustíveis e boa capacidade de transporte de oxigênio (Johansson *et al.*, 2006; Li *et al.*, 2017; Matzen *et al.*, 2017; Mei *et al.*, 2022).

No entanto, como são necessárias temperaturas operacionais relativamente baixas (abaixo de 800 °C) para obter concentrações de equilíbrio relevantes no sistema CRQDO, o uso de óxidos de manganês puros como TOs não é promissor (Azimi *et al.*, 2013; Li *et al.*, 2017). No entanto, essa temperatura pode ser aumentada pela combinação de óxido de manganês puro com outros materiais (por exemplo, Fe, Ni, Si, Mg e Ca) para melhorar suas características intrínsecas, como a baixa resistência mecânica. Assim, o uso de TOs sintéticos e minerais é uma excelente alternativa para substituir o óxido de manganês puro em processos de recirculação química, uma vez que esses compostos possuem outros metais, além do manganês, o que melhora a resistência mecânica, a reatividade e a capacidade de transporte de oxigênio do material (Adáñez-Rubio *et al.*, 2023; Johansson *et al.*, 2006; Ksepko & Lysowski, 2021; Liu *et al.*, 2020; Nascimento *et al.*, 2020; Sarshar *et al.*, 2011; Sun *et al.*, 2017).

Nesse cenário, a análise bibliométrica surge como uma ferramenta quantitativa e estatística essencial para analisar parâmetros observáveis de um portfólio de documentos científicos em bancos de dados relevantes. Essa abordagem envolve um estudo sistemático da literatura e de outras mídias relacionadas ao tema da pesquisa (Araújo, 2006; Ksepko & Lysowski, 2021; Nascimento *et al.*, 2022; Pimenta, 2017; Rotili *et al.*, 2022; Silva *et al.*, 2018). De acordo com Pimenta *et al.* (2017), o principal objetivo dessas bases de dados é mapear e analisar a produtividade de autores, instituições, áreas de conhecimento e o fator de impacto (FI) dos periódicos. Assim, com base nas métricas bibliométricas, este estudo visa contribuir para a pesquisa sobre os processos de RQ, identificando tendências por meio da análise de publicações recentes, explorando condições otimizadas para a fabricação de TOs com propriedades físico-químicas satisfatórias para aplicação no processo de RQ, promovendo novos conhecimentos e contribuindo para o avanço tecnológico desse processo.

Nesse artigo será realizada uma análise bibliométrica de um portfólio bibliográfico de artigos científicos de 2006 a 2023 relacionados à aplicação de TOs à base de manganês em processos de RQ, por meio da seleção cuidadosa de artigos científicos e da avaliação de vários parâmetros, incluindo autoria, áreas de estudo, distribuição temporal das publicações, fontes de publicação, afiliações institucionais, países de origem, tipos de publicação, número de citações e coocorrências de palavras-chave, destacando os principais desafios que serão enfrentados nessa área de estudo. Vale ressaltar que esse artigo é parte integrante da dissertação de mestrado de A. B. SILVA (Silva, 2024).

2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Para selecionar o portfólio, foi escolhido o método ProKnow-C (processo de desenvolvimento do conhecimento - construtivista) descrito por Lacerda, Ensslin e Ensslin (Lacerda

et al., 2012). Inicialmente, as palavras-chave *oxygen carrier*, *manganese*, *Mn*, *chemical looping combustion* e *CLC* foram escolhidas para a pesquisa nos bancos de dados *Web of Science* e *Scopus*. As buscas foram realizadas usando os seguintes algoritmos: ((Oxygen Carrier\$) AND (Manganese OR Mn)) AND (Chemical Looping Combustion OR CLC). A pesquisa no banco de dados *Web of Science* resultou em 426 documentos, enquanto na *Scopus* foram encontrados 266 documentos. Portanto, a primeira foi escolhida para a análise bibliométrica, pois apresentou mais resultados.

Os documentos gerados pelo banco de dados *Web of Science* foram importados para uma planilha do Excel e os títulos foram lidos para verificar se estavam alinhados com o tema de pesquisa "transportadores de oxigênio à base de manganês para aplicação em processos de recirculação química". Os documentos escolhidos foram classificados em ordem decrescente pelo número de citações (NC) e, em seguida, foram calculadas a porcentagem de citações (%PC) e a porcentagem de citações acumuladas (%PCA). Em seguida, os documentos mais reconhecidos foram selecionados usando a regra de Pareto (%PCA ≤ 80%). Os documentos não reconhecidos publicados após 2021 foram selecionados e classificados como recentes. Os não reconhecidos e os não recentes passaram por uma repescagem chamada Banco de Autores Reconhecidos; se algum dos autores com documentos reconhecidos estivesse presente como coautor, o documento também era selecionado.

Em seguida, foi verificado se os resumos dos documentos selecionados estavam alinhados com o tema da pesquisa. Em caso positivo, foi realizada a leitura integral dos mesmos para verificar se continham dados referentes à composição elementar dos transportadores de oxigênio, fases ativas, resistência mecânica, taxa de atrito, porosidade, temperatura da termobalança ou do reator, reatividade, capacidade de transporte de oxigênio e índice de taxa. Os documentos que continham a maioria desses dados foram selecionados para fazer parte do portfólio, e os demais foram excluídos.

Logo depois, foram realizadas análises bibliométricas utilizando a base de dados *Web of Science*, o aplicativo VOSviewer e a planilha eletrônica Excel. Assim, foram construídas tabelas, gráficos e mapas bibliométricos (com palavras-chave). Nos registros obtidos, foram coletadas as variáveis autor, área de estudo, ano de publicação, periódico por ano de publicação, afiliação (instituição), país e tipo. A Figura 1 descreve resumidamente os procedimentos metodológicos.

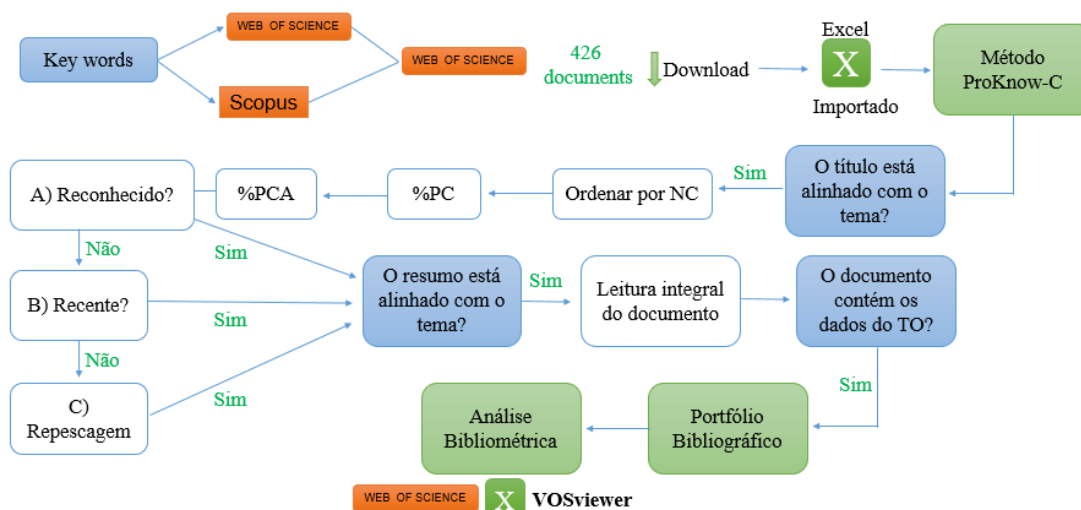


Fig. 1 Procedimentos metodológicos

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

No banco de dados *Web of Science*, foram identificados 426 documentos, e a seleção de documentos pelo método ProKnow-C é mostrada na Tabela 1. Assim, 65 documentos foram selecionados e os 12 coautores com o maior número de documentos estão descritos na Figura 2. Alberto Abad tem o maior número de documentos (27 documentos), sendo Abad *et al.* (2006) o mais relevante (244 citações). Esse artigo testou um TO à base de manganês suportado em zircônia estabilizada com magnésio em uma unidade de CRQ de tamanho laboratorial com fluxo contínuo, usando metano e gás de síntese como combustíveis, obtendo 88 - 99% de eficiência de combustão com metano e 100% com gás de síntese. Eles também não encontraram aglomeração ou desativação do TO durante o experimento.

Table 1 Método ProKnow-C

Procedimento	Número de documentos selecionados
Título alinhado com o tema	176
(A) Reconhecido	74
(B) Recente	17
(C) Repescagem	50
A + B + C	141
Resumo alinhado com o tema	123
Documento alinhado com os dados referentes às características dos transportadores de oxigênio	65
Portfólio bibliográfico	65

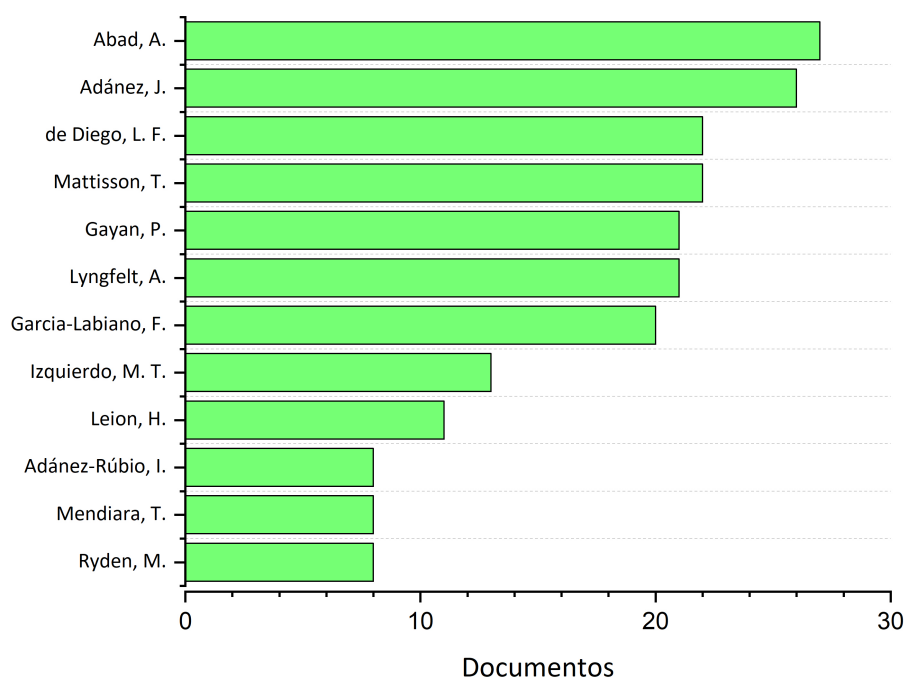


Fig. 2 Documentos por coautor

(Fonte: <https://www-webofscience.ez18.periodicos.capes.gov.br>)

Juan Adáñez, com 26 documentos, e Luis Francisco de Diego, com 22 documentos, são coautores de Abad et al. (2015), que é o documento mais relevante de ambos os autores (56 citações). Esse artigo estabeleceu a cinética das reações químicas durante os ciclos redox nos processos CRQ e CRQDO de um transportador de oxigênio do tipo perovskita com a fórmula $\text{CaMg}_{0.1}\text{Ti}_{0.125}\text{Mn}_{0.775}\text{O}_{2.9-\delta}$ e determinou a reatividade e a capacidade de transporte de oxigênio do material durante a redução com CH_4 , CO , H_2 e N_2 . Juan Adáñez, Luis Francisco de Diego e colaboradores observaram que a reatividade do material aumentou a cada ciclo redox, enquanto a capacidade total de transporte de oxigênio diminuiu de 8,5 para 8,0% em peso.

A Figura 3 descreve a porcentagem de documentos por área de estudo. Sessenta documentos eram da área de Engenharia (43,8%), 52 de Combustíveis Energéticos (38%), 13 de Química (9,5%), 7 de Ciência & Tecnologia - Outros Tópicos (5,1%), 2 de Termodinâmica (1,5%) e 3 de Outras Áreas (2,2%). A Engenharia estudou o desenvolvimento de TOs e reatores para processos de RQ; em Combustíveis Energéticos, os artigos se concentraram na aplicação de combustíveis (metano, hidrogênio, gás de síntese, carvão, biomassa, entre outros) em processos de RQ; em Química, os artigos se concentraram nas reações químicas entre TOs e combustível e entre TOs e ar; em Ciência e Tecnologia e outros tópicos, há mais artigos relacionados à criação de novos TOs, testes de protótipos de reatores para processos de RQ e operação de reatores. Além disso, foi avaliada a influência do tratamento térmico sobre a reatividade e a composição estrutural dos TOs.

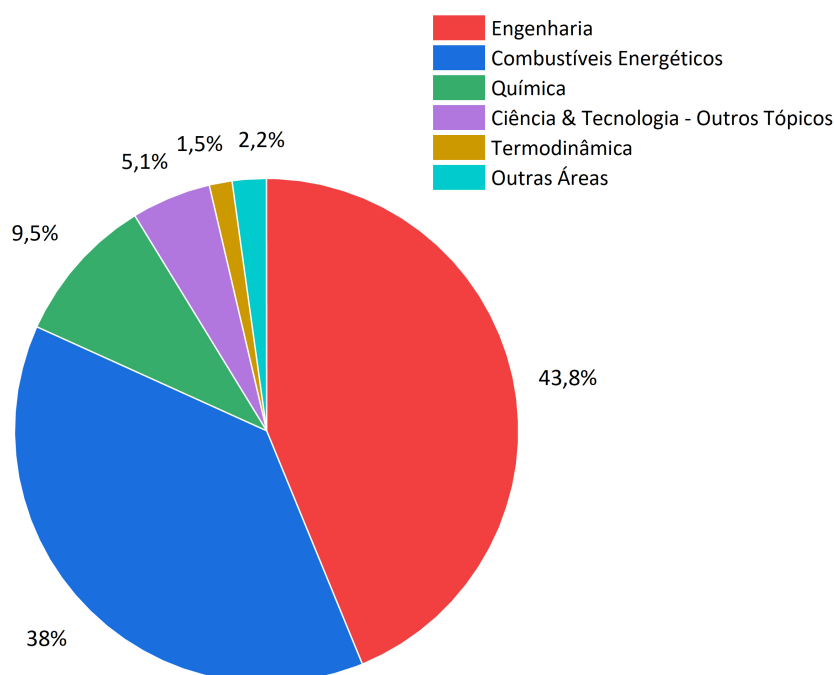


Fig. 3 Documentos por área de estudo

(Fonte: <https://www-webofscience.ez18.periodicos.capes.gov.br>)

Os 65 documentos do portfólio foram publicados entre 2006 e 2023. Uma análise preliminar revelou que o maior número de publicações ocorreu entre 2014 e 2022 (Figura 4), sendo 2017 e 2018 os anos mais prolíficos, com 8 e 10 documentos, respectivamente. O documento mais relevante em 2017 (43 citações) foi Sun *et al.* (2017). Nele, foi realizada uma análise termogravimétrica para determinar a reatividade e o desempenho redox de TOs de minério de ilmenita com a adição de óxidos de cério, zircônio, níquel e manganês frente ao gás metano. A adição de óxido de manganês ao minério de ilmenita teve um efeito positivo sobre o TO, aumentando a capacidade de transporte de oxigênio, a resistência à aglomeração e a reatividade durante a combustão do metano, devido à formação de óxidos de ferrimanganês.

O documento mais relevante em 2018 (52 citações) foi Adánez-Rúbio *et al.* (2018). Esse artigo avaliou a combustão de diferentes biomassas em uma unidade CRQ contínua de 1,5 kWth usando óxido de Cu-Mn e descobriu que esse transportador de oxigênio tem propriedades CRQDO, alta captura de CO₂ e 100% de eficiência de combustão. Em 2019, houve um declínio muito significativo no número de publicações, que incluiu, dentro das limitações da pesquisa, quatro documentos. No entanto, nos últimos dois anos, o número de publicações aumentou para oito (cinco em 2022 e três em 2023). Desses, seis artigos (Abad *et al.*, 2022; Adánez-Rubio *et al.*, 2023; Adánez-Rubio *et al.*, 2022; Barua *et al.*, 2022; Liang *et al.*, 2023; Ma *et al.*, 2022) se concentraram em TOs sintéticos (75%) e dois deles (Liu *et al.*, 2023; Zornoza *et al.*, 2022) em minerais (25%). Assim, houve uma tendência de concentrar a pesquisa em TOs sintéticos otimizados para RQ, uma vez que os TOs sintéticos à base de manganês têm uma taxa de atrito menor e baixa aglomeração de partículas. Três desses TOs sintéticos testaram o óxido de manganês puro e os outros três avaliaram TOs com suporte de Al₂O₃, SiO₂ e MgO, e Fe-Mn.

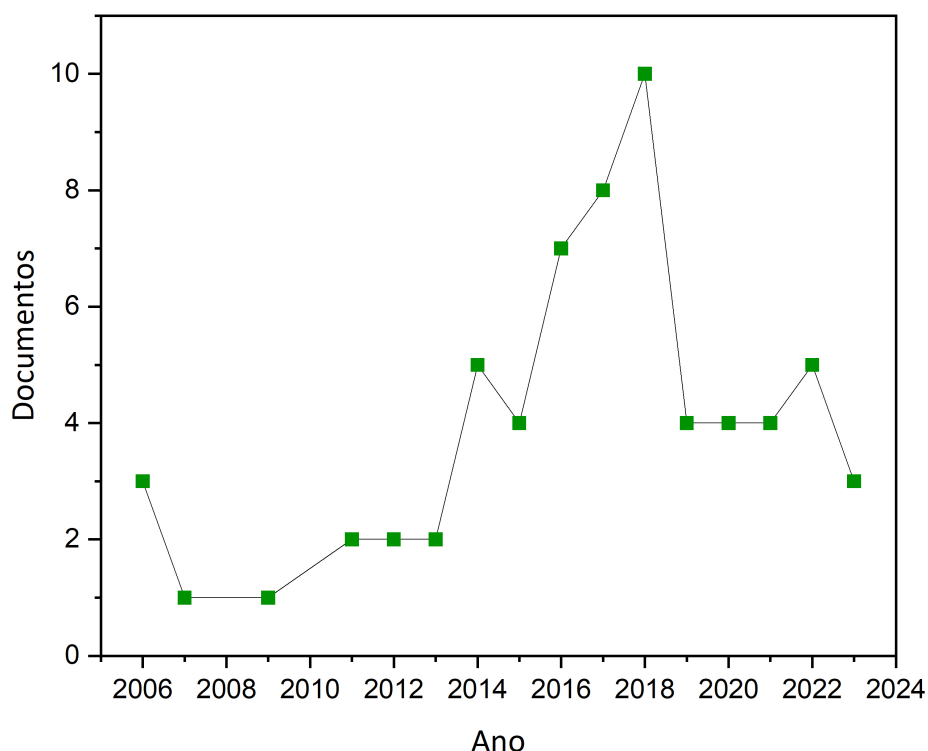


Fig. 4 Documentos por ano de publicação

(Fonte: <https://www-webofscience.ez18.periodicos.capes.gov.br>)

Em relação às fontes de pesquisa por ano, de acordo com a Figura 5, sete artigos foram da *Fuel*, entre 2019 e 2023, que publicou a maioria dos estudos desse portfólio, seguida pela *Fuel Processing Technology* e pela *Industrial & Engineering Chemistry Research*, que publicaram cinco e dois artigos, respectivamente. As demais fontes de pesquisa publicaram apenas um (01) artigo cada.

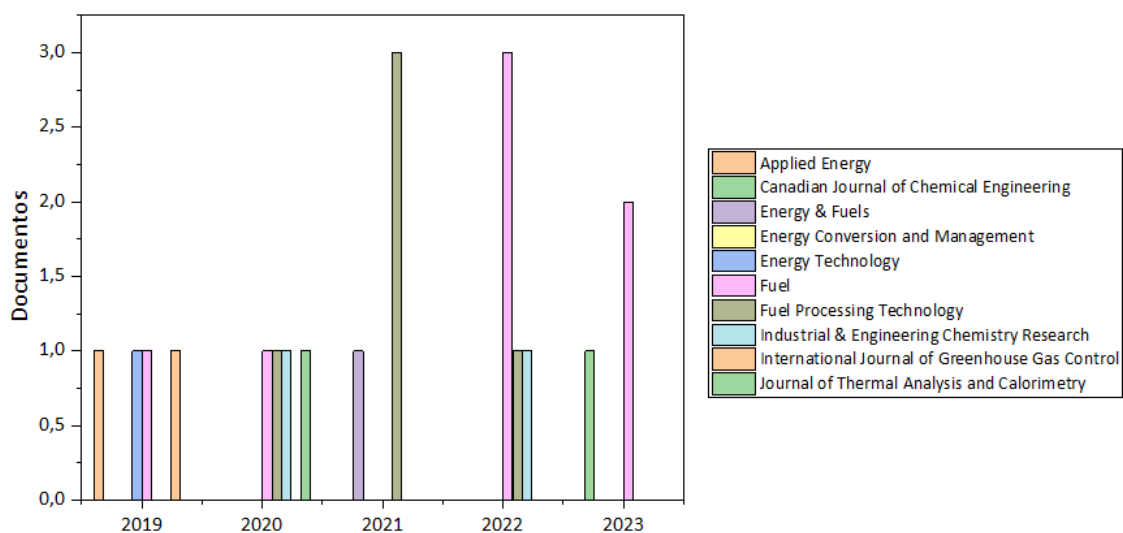


Fig. 5 Documentos por fonte de pesquisa por ano

(Fonte: <https://www-webofscience.ez18.periodicos.capes.gov.br>)

Em relação à afiliação (Figura 6) e ao país (Figura 7), verificou-se que a maioria das cinco instituições com o maior número de publicações entre 2006 e 2023 era da Espanha, pois 25 documentos foram produzidos pelo *Institute of Carbochemistry ICB CSIC*. Em seguida, vem a Suécia, com 24 documentos da *Chalmers University of Technology*; e a China, com nove documentos da *Tsinghua University* (três documentos), da *Huazhong University of Science and Technology* (dois documentos) e de outras universidades (quatro documentos). A Figura 6 mostra três documentos da América do Sul, produzidos pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte, no Brasil, e um da Universidade de Valle, na Colômbia, demonstrando um número muito pequeno de estudos relacionados a transportadores de oxigênio à base de manganês para uso em processos de recirculação química nesse continente.

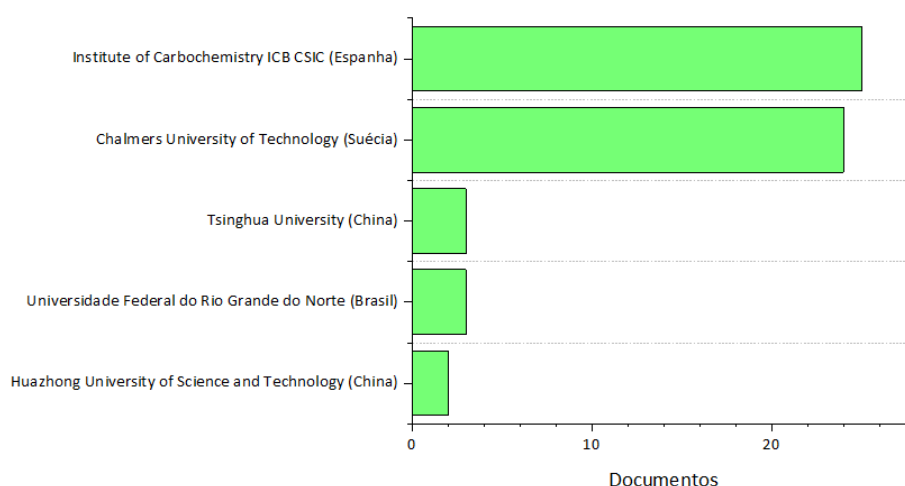


Fig. 6 Documentos por afiliação

(Fonte: <https://www-webofscience.ez18.periodicos.capes.gov.br>)

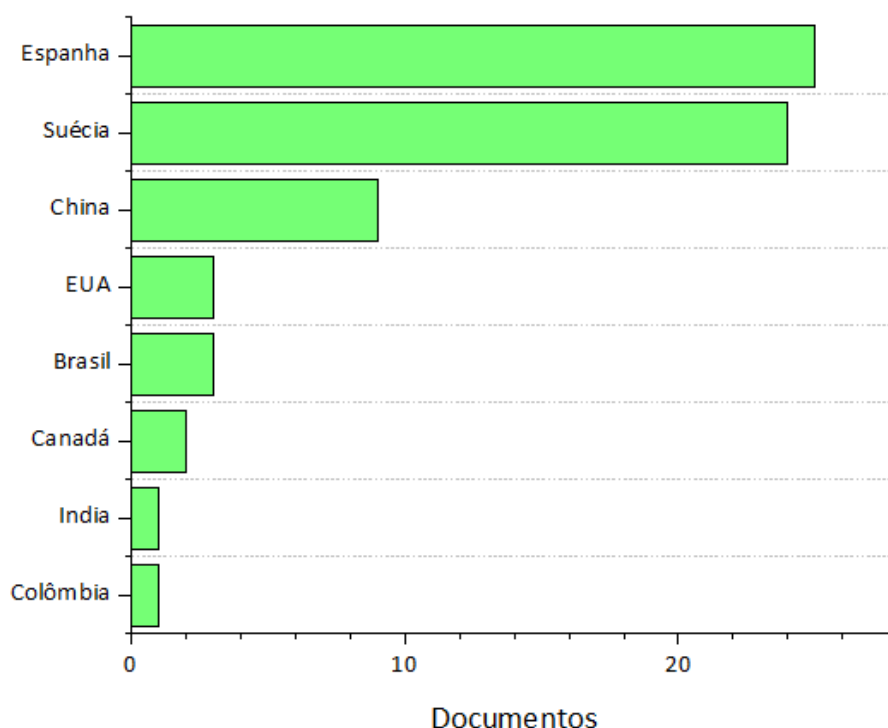


Fig. 7 Documentos por país

(Fonte: <https://www-webofscience.ez18.periodicos.capes.gov.br>)

Ao analisar os documentos por país, é possível concluir que o artigo mais relevante foi Abad *et al.* (2015), produzido na Espanha (55 citações), pelo ICB CSIC, já discutido aqui. Na Suécia, o artigo mais relevante (244 citações) foi Abad *et al.* (2006), produzido pela *Chalmers University of Technology*, também já discutido. Na China, com 50 citações, o artigo mais relevante foi Mei *et al.* (2015), produzido pela *Huazhong University of Science and Technology*, que realizou um estudo em um reator de leito fluidizado de quatro minérios de manganês como TOs e descobriu que os materiais MnSA e MnGBHNE são promissores para a combustão com carvão, pois apresentaram excelente reatividade com H₂ e CO, excelente resistência mecânica e alta taxa de atrito. O documento mais relevante produzido no Brasil (35 citações), pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte, foi Costa *et al.* (2018), que prepararam cinco transportadores de oxigênio impregnando Mn₃O₄ ou Mg₆MnO₈ em três suportes comerciais baseados em zircônia e aluminato de cálcio sintético e descobriram que o TO com o suporte de ZrO₂ (Mn-ZrSG) tinha alta reatividade, baixa taxa de atrito e nenhuma aglomeração, tornando-o um possível candidato como transportador de oxigênio para o processo iG-CRQ usando carvão ou biomassa.

De acordo com a Figura 8, os autores com o maior número de citações são Lyngfelt, A. (1342 citações), Mattisson, T. (1307 citações) e Abad, A. (1015 citações). A Tabela 2 descreve os dez (10) documentos mais relevantes no portfólio bibliográfico e os três (3) mais relevantes com o maior número de citações. De acordo com a Tabela 2 e a Figura 9, são eles Abad *et al.* (2006), com 244 citações, já discutido acima; Linderholm *et al.* (2012), com 156 citações, que avaliaram a ilmenita e o minério de manganês como possíveis TOs para aplicação em uma unidade CRQ de fluxo contínuo e verificaram que o minério de manganês aumentou consideravelmente a taxa de gaseificação do carvão e a conversão de gás; e Leion *et al.* (2009), com 133 citações, que realizaram

análises com um material do tipo perovskita com a fórmula $\text{CaMn}_{0.875}\text{Ti}_{0.125}\text{O}_3$ em uma termobalança e leito fluidizado usando metano e coque de petróleo como combustíveis. Eles concluíram que o material apresentou resultados promissores em ambos os testes, tornando-o um possível candidato a TO para a CRQDO. Por fim, foram investigados os tipos de documentos no portfólio. De acordo com a Figura 10, há 62 artigos (93,9%) e 4 trabalhos de conferência (6,1%).

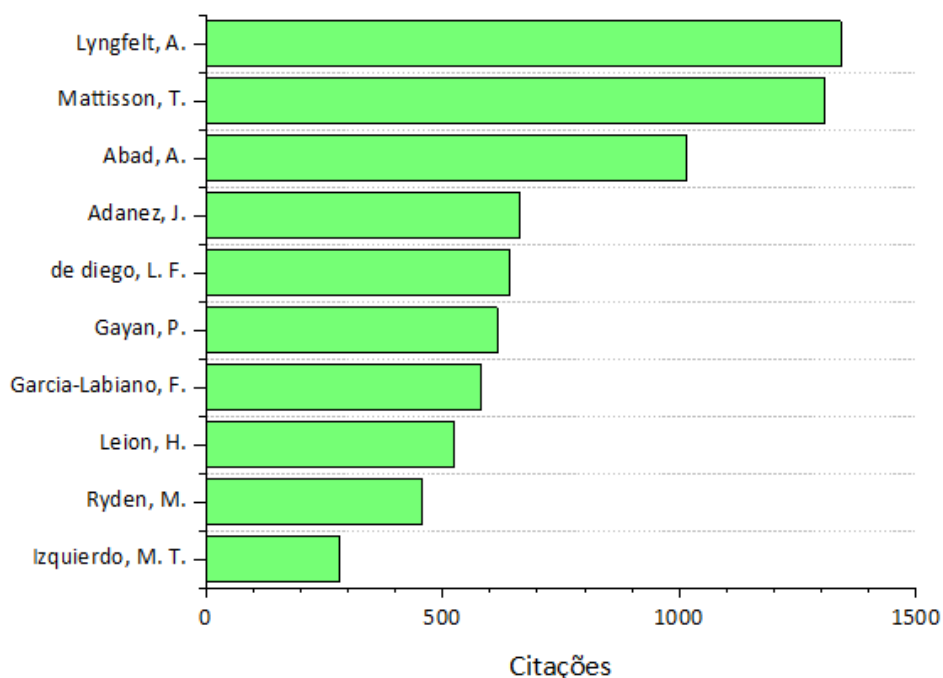


Fig. 8 Número de citações por autor

(Fonte: <https://www-webofscience.ez18.periodicos.capes.gov.br>)

Table 2 Lista dos 10 documentos mais relevantes do portfólio bibliográfico

Rank	Título	Autores	Ano	NC	Jornal	FI
1	Chemical-looping combustion in a 300 W continuously operating reactor system using a manganese-based oxygen carrier (Abad <i>et al.</i> , 2006)	A. Abad; T. Mattisson; A. Lyngfelt; M. Ryden	2006	244	Fuel	7.4
2	Chemical-looping combustion of solid fuels - Operation in a 10 kW unit with two fuels, above-bed and in-bed fuel feed and two oxygen carriers, manganese ore and ilmenite (Linderholm <i>et al.</i> , 2012)	C. Linderholm; A. Lyngfelt; A. Cuadrat; E. Jerndal	2012	156	Fuel	7.4
3	Use of $\text{CaMn}_{0.875}\text{Ti}_{0.125}\text{O}_3$ as Oxygen Carrier in Chemical-Looping with Oxygen Uncoupling (Leion <i>et al.</i> , 2009)	H. Leion; Y. Larring; E. Bakken; R. Bredesen; T. Mattisson; A. Lyngfelt,	2009	133	Energy & Fuels	5.3
4	Reduction and oxidation kinetics of $\text{Mn}_3\text{O}_4/\text{Mg-ZrO}_2$ oxygen carrier particles for chemical-looping combustion (Zafar <i>et al.</i> , 2007)	Q. Zafar; A. Abad; T. Mattisson; B. Gevert; M. Strand	2007	119	Chem. Eng. Sci.	4.7

5	Investigation of different manganese ores as oxygen carriers in chemical-looping combustion (CLC) for solid fuels (Arjmand <i>et al.</i> , 2014)	M. Arjmand; H. Leion; T. Mattisson; A. Lyngfelt	2014	116	Appl. Energy	11.2
6	Investigation of Mn ₃ O ₄ with stabilized ZrO ₂ for chemical-looping combustion (Johansson <i>et al.</i> , 2006)	M. Johansson; T. Mattisson; A. Lyngfelt	2006	114	Chem. Eng. Res. Des.	3.9
7	Defluidization conditions for a fluidized bed of iron oxide-, nickel oxide-, and manganese oxide-containing oxygen carriers for chemical-looping combustion (Cho <i>et al.</i> , 2006)	P. Cho; T. Mattisson; A. Lyngfelt	2006	112	Ind. Eng. Chem. Res.	4.2
8	Chemical - Looping with oxygen uncoupling using Mn/Mg-based oxygen carriers - Oxygen release and reactivity with methane (Shulman <i>et al.</i> , 2011)	A. Shulman; E. Cleverstam; T. Mattisson; A. Lyngfelt,	2011	98	Fuel	7.4
9	Novel oxygen carriers for chemical looping combustion: La _{1-x} Ce _x BO ₃ (B = Co, Mn) perovskites synthesized by reactive grinding and nanocasting (Sarshar <i>et al.</i> , 2011)	Z. Sarshar; F. Kleitz; S. Kaliaguine	2011	91	Energy Environ. Sci.	32.5
10	Ca(1-x)A(x)MnO(3) (A = Sr and Ba) perovskite based oxygen carriers for chemical looping with oxygen uncoupling (CLOU) (Galinsky <i>et al.</i> , 2015)	N. Galinsky; A. Mishra; J. Zhang; F. X. Li	2015	82	Appl. Energy	11.2

*NC: número de citações

FI: fator de impacto

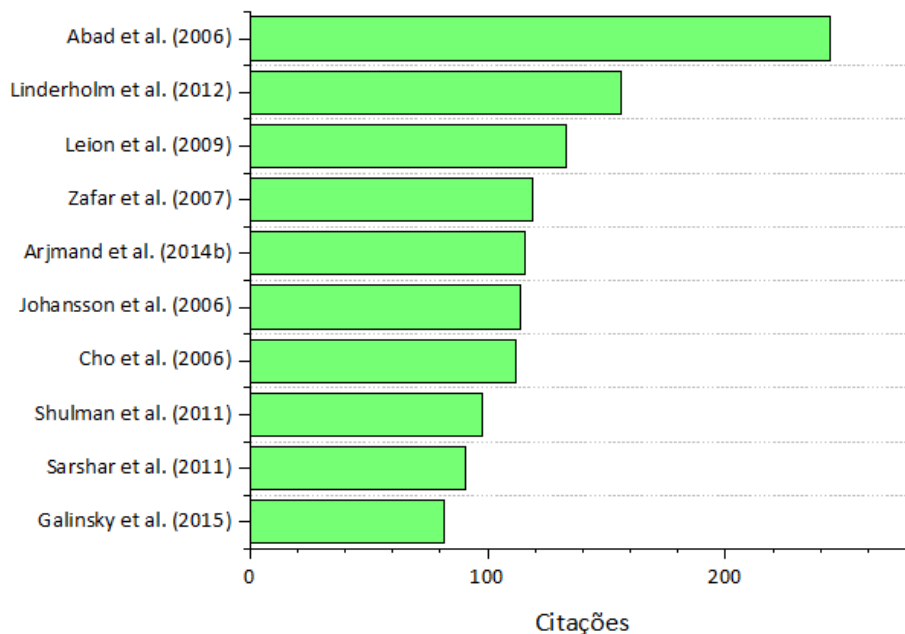


Fig. 9 Número de citações por documentos
(Fonte: <https://www-webofscience.ez18.periodicos.capes.gov.br>)

Artigo

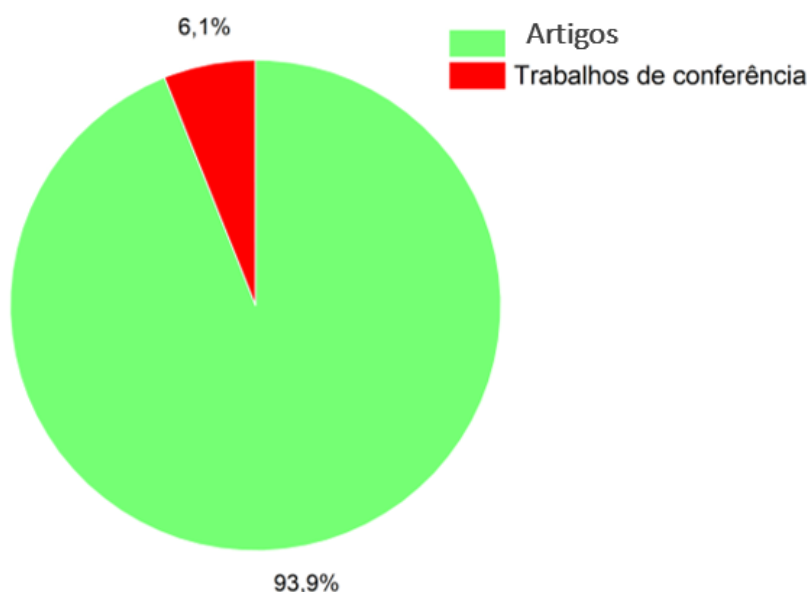


Fig. 10 Documentos por tipo

(Fonte: <https://www-webofscience.ez18.periodicos.capes.gov.br>)

De acordo com a Figura 11, as palavras-chave mais frequentes nos resumos e títulos dos artigos foram *chemical-looping combustion* (45 ocorrências), *CO₂ capture* (28 ocorrências), *oxygen carrier* (26 ocorrências), *chemical-looping with oxygen uncoupling* (25 ocorrências) e *solid fuels* (23 ocorrências). A palavra-chave *chemical-looping combustion* tem uma forte relação com as palavras-chave *oxygen carrier* (transportador de oxigênio), *manganese ore* (minério de manganês), *solid fuels* (combustíveis sólidos) e *biomass* (biomassa), mostrando que a pesquisa tem se concentrado em testar minérios de manganês e óxidos sintéticos como potenciais TOs usando biomassa como combustível nos últimos anos, como visto em Condori *et al.* (2021), Adánez-Rubio *et al.* (2023), Adánez-Rubio *et al.* (2022) e Sundqvist *et al.* (2018). A Figura 12 ilustra os processos CRQ e CRQDO usando TOs à base de manganês, destacando os tipos de transportadores, a captura de dióxido de carbono, a redução de TO e o uso de combustíveis sólidos e gasosos.

Apesar do aumento das pesquisas sobre TOs à base de manganês para seu uso em tecnologias RQ nos últimos 18 anos, encontrar um TO que possa suportar o estresse de leitos fluidizados e ter uma longa vida útil continua sendo o maior desafio para esse tipo de material nos processos CRQ e CRQDO, já que a maioria dos transportadores à base de manganês tem alta fricção, taxa de aglomeração e baixa resistência mecânica. Entretanto, vários TOs foram desenvolvidos recentemente com melhorias nessas três propriedades deficientes. Adánez-Rubio *et al.* (2021) estudaram dois óxidos mistos de Cu-Mn com e sem a adição de caulim, e o TO que o continha apresentava maior resistência ao atrito e as partículas não se aglomeravam, mas a reatividade diminuía; Adánez-Rubio *et al.* (2023) obtiveram dois TOs muito promissores para CRQDO, M24Mg76 e M48Mg51, que apresentaram boa capacidade de transporte de oxigênio, excelente reatividade, baixa taxa de atrito e boa resistência mecânica; Liang *et al.* (2023), que examinaram a capacidade de dissociação de oxigênio para CRQDO e a estabilidade em ciclos redox de duas perovskitas baseadas em lama vermelha ($\text{CaMn}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}\text{O}_{3-\delta}$ - red mud and $\text{CaMn}_{0.75}\text{Fe}_{0.25}\text{O}_{3-}$

δ - red mud), concluíram que essas perovskitas apresentaram excelentes resultados em ambos os aspectos investigados.

Além da busca por TOs à base de manganês que sejam otimizados para CRQ/CRQDO, a pesquisa atual busca desenvolver materiais sintéticos com suportes inertes para as fases ativas que melhorem sua reatividade e tenham boas resistência mecânica e propriedades magnéticas (Abad *et al.*, 2022). Abad *et al.* (2022) sintetizaram um TO à base de cobre suportado em Mn50Fe-1200 (49% Mn e 51% Fe a 1200 °C), que apresentou alta reatividade e boas características mecânicas e magnéticas. Adánez-Rubio *et al.* (2022) obtiveram um transportador Cu30MnFe-Mag usando um suporte Mn-Fe e descobriram que ele era altamente reativo a diferentes biomassas e tinha excelentes características mecânicas e magnéticas. Pérez-Vega *et al.* (2019) determinaram que um óxido misto de Mn-Fe dopado com TiO₂ (Mn66FeTi7) apresentou excelente reatividade com combustível sólido, propriedades magnéticas, resistência mecânica e capacidade de dissociação de oxigênio.

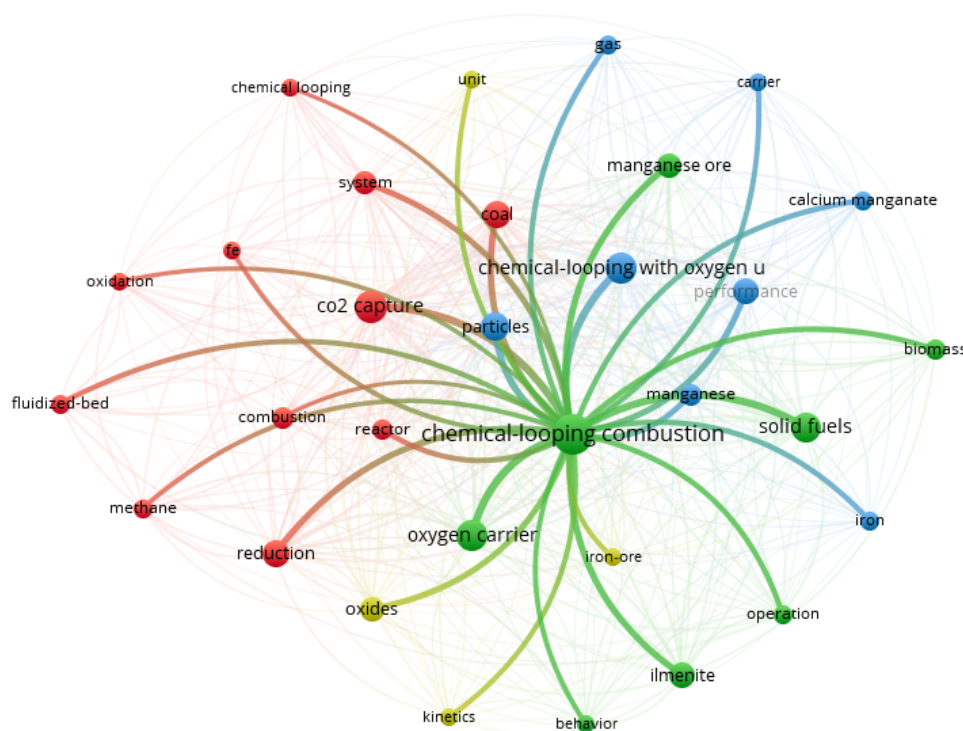


Fig. 11 Mapa bibliométrico (combustão por recirculação química)
(Fonte: <https://www-webofscience.ez18.periodicos.capes.gov.br>)

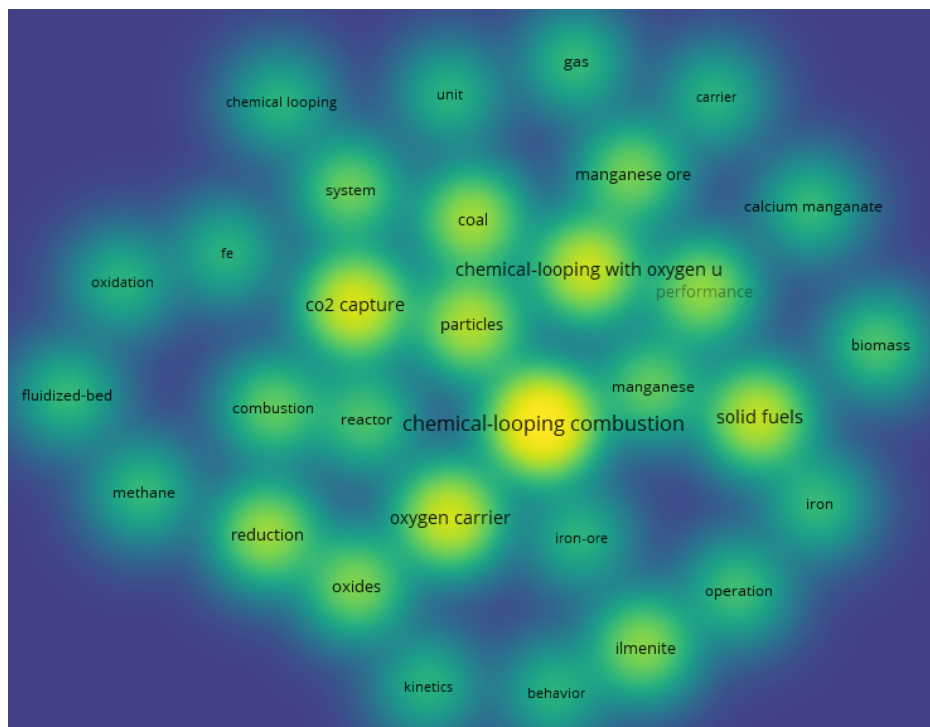


Fig. 12 Mapa bibliométrico (processos CRQ e CRQDO)
(Fonte: <https://www-webofscience.ez18.periodicos.capes.gov.br>)

4 CONCLUSÕES

Em resumo, a análise bibliométrica revelou uma tendência crescente de interesse e pesquisa em transportadores de oxigênio sintéticos à base de manganês. Esses TOs apresentaram características muito promissoras, como uma taxa de atrito reduzida e uma baixa propensão a se aglomerar em leitos fluidizados contínuos. Portanto, este estudo bibliométrico desempenha um papel fundamental na otimização desses transportadores, destacando os principais artigos publicados nos últimos 18 anos. Esse trabalho também fornecerá uma base sólida na literatura científica para determinar os artigos mais relevantes na área, facilitando o processo de otimização de novos TOs à base de manganês para atender a todos os requisitos físico-químicos necessários para aplicações em leitos fluidizados contínuos.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à Pró-Reitoria de Pesquisa da UFRN (PROPESQ) e ao Programa de Pós-Graduação em Química da UFRN (PPGQ) pelo apoio financeiro.

Referências

Abad A, Pérez-Vega R, Izquierdo MT, Gayán P, García-Labiano F, de Diego LF, Adánez J (2022). Novel magnetic manganese-iron materials for separation of solids used in high-temperature

processes: Application to oxygen carriers for chemical looping combustion. Fuel 320 123901. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123901>

Abad A, Labiano FG, Gayán P, de Diego LF, Adánez J (2015). Redox kinetics of $\text{CaMg}_{0.1}\text{Ti}_{0.125}\text{Mn}_{0.775}\text{O}_{2.9-\delta}$ for Chemical Looping Combustion (CLC) and Chemical Looping with Oxygen Uncoupling (CLOU). Chemical Engineering Journal 269 67 - 81. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2015.01.033>

Abad A, Mattisson T, Lyngfelt A, Rydén M (2006). Chemical-looping combustion in a 300 W continuously operating reactor system using a manganese-based oxygen carrier. Fuel 85 1174–1185. DOI: <https://10.1016/j.fuel.2005.11.014>

Ministry of Science, Technology, Innovations and Communications (MSTIC) (2015). Paris Agreement; MSTIC: Brasília. [https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/acordo-de-paris-e-ndc/arquivos/pdf/acordo_paris.pdf]. Accessed in April 2023.

Adánez J, Abad A, García-Labiano F, Gayán P, de Diego LF (2012). Progress in Chemical-Looping Combustion and Reforming Technologies: Review. Progress in Energy and Combustion Science 38 215-282. DOI: <https://doi:10.1016/j.pecs.2011.09.001>

Adánez-Rubio I, Mattisson T, Jacobs M, Adánez J (2023). Development of new Mn-based oxygen carriers using MgO and SiO₂ as supports for Chemical Looping with Oxygen Uncoupling (CLOU). Fuel 337 127177. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.127177>

Adánez-Rubio I, Samprón I, Izquierdo MT, Abad A, Gayán P, Adánez J (2022). Coal and biomass combustion with CO₂ capture by CLOU process using a magnetic Fe-Mn-supported CuO oxygen carrier. Fuel 314 122742. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122742>

Adánez-Rubio I, Nilsson A, Izquierdo MT, Mendiara T, Abad A, Adánez J (2021). Cu-Mn oxygen carrier with improved mechanical resistance: Analyzing performance under CLC and CLOU environments. Fuel Processing Technology 217 106819. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2021.106819>

Adánez-Rubio I, Pérez-Astraya A, Mendiara T, Izquierdo MT, Abad A, Gayán P, de Diego LF, García-Labiano F, Adánez J (2018). Chemical looping combustion of biomass: CLOU experiments with a Cu-Mn mixed oxide. Fuel Processing Technology 172 179-186. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2017.12.010>

Araújo CAA (2006). Bibliometria: evolução histórica e questões atuais. Em questão, v. 12, n. 1, p. 11-32. DOI: <https://seer.ufrgs.br/index.php/EmQuestao/article/view/16>

Archer D (2005). Fate of fossil fuel CO₂ in geologic time. J Geophys Res 110 C09S05. DOI: <https://doi:10.1029/2004JC002625>

- Arjmand M, Leion H, Mattisson T, Lyngfelt A (2014). Investigation of different manganese ores as oxygen carriers in chemical-looping combustion (CLC) for solid fuels. *Applied Energy* 113 1883-1894. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.06.015>
- Azimi G, Leion H, Rydén M, Mattisson T, Lyngfelt A (2013). Investigation of Different Mn-Fe Oxides as Oxygen Carrier for Chemical-Looping with Oxygen Uncoupling (CLOU). *Energy Fuels* 27, 367-377. DOI: <https://dx.doi.org/10.1021/ef301120r>
- Barua T, Horlick S, Padak B (2022). Experimental Investigation of the Effects of Fluidizing Gas on Copper-Manganese Mixed Oxide's Reactivity for Chemical Looping Combustion of CH₄. *Ind. Eng. Chem. Res.* 61, 7245-7254. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.2c00633>
- Condori O, de Diego LF, García-Labiano F, Izquierdo MT, Abad A, Adánez J (2021). Syngas Production in a 1.5 kWth Biomass Chemical Looping Gasification Unit Using Fe and Mn Ores as the Oxygen Carrier. *Energy Fuels* 35, 17182-17196. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.1c01878>
- Costa TR, Gayán P, Abad A, García-Labiano F, de Diego LF, Melo DMA, Adánez J (2018). Mn-based oxygen carriers prepared by impregnation for Chemical Looping Combustion with diverse fuels. *Fuel Processing Technology* 178 236 - 250. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2018.05.019>
- Costa RCP (2019). Transportadores sólidos de oxigênio a base de Cu e Mn suportados em minerais para utilização em tecnologia de recirculação química com captura de CO₂. Tese (Doutorado)-UFRN, CCET, PPGQ - Natal: UFRN, 126 f.: il.
- Cho P, Mattisson T, Lyngfelt A (2006). Defluidization Conditions for a Fluidized Bed of Iron Oxide-, Nickel Oxide-, and Manganese Oxide-Containing Oxygen Carriers for Chemical-Looping Combustion. *Ind. Eng. Chem. Res.* 45, 968-977. DOI: <https://10.1021/ie050484d>
- Galinsky N, Mishra A, Zhang J, Li F (2015). Ca_{1-x}A_xMnO₃ (A = Sr and Ba) perovskite based oxygen carriers for chemical looping with oxygen uncoupling (CLOU). *Applied Energy* 157 358-367. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.04.020>
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2014). IPCC fifth assessment report. 2014: Intergovernmental panel on climate change. Available at: <https://archive.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf>. Accessed: 29 jul. 2022.
- IPCC (2005): IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Metz, B., O. Davidson, H. C. de Coninck, M. Loos, and L. A. Meyer (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United

Kingdom and New York, NY, USA, 442 pp. <https://www.ipcc.ch/report/carbon-dioxide-capture-and-storage/>

Johansson M, Mattisson T, Lyngfelt A (2006). Investigation of Mn₃O₄ with stabilized ZrO₂ for Chemical-Looping Combustion. Trans IChemE, Part A, Chemical Engineering Research and Design, 84(A9): 807– 818. DOI: <https://10.1205/cherd.05206>

Ksepko E, Lysowski R (2021). Extremely Stable and Durable Mixed Fe–Mn Oxides Supported on ZrO₂ for Practical Utilization in CLOU and CLC Processes. Catalysts 11 1285. DOI: <https://doi.org/10.3390/catal11111285>

Lacerda RTO, Ensslin L, Ensslin SR (2012). Uma análise bibliométrica da literatura sobre estratégia e avaliação de desempenho. Gest. Prod., São Carlos, v. 19, n. 1, p. 59-78. Available in: <https://www.scielo.br/j/gp/a/sKh5wfCCGv68fdRP8GStLXC/>

Leion H, Larring Y, Bakken E, Bredesen R, Mattisson T, Lyngfelt A (2009). Use of CaMn_{0.875}Ti_{0.125}O₃ as Oxygen Carrier in Chemical-Looping with Oxygen Uncoupling. Energy Fuels 23, 5276–5283. DOI: <https://10.1021/ef900444d>

Li J, Zhang H, Gao Z, Fu J, Ao W., Dai J (2017). CO₂ Capture with Chemical Looping Combustion of Gaseous Fuels: An Overview. Energy Fuels 31, 3475–3524. DOI: <https://10.1021/acs.energyfuels.6b03204>

Liang W, Wang F, Wang C, Yang H, Cui W, Yue G (2023). Investigation on the oxygen-carrying performance and reaction kinetics of CaMn_xFe_{1-x}O_{3-δ} perovskites prepared from red mud. Fuel 331 125929. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125929>

Linderholm C, Lyngfelt A, Cuadrat A, Jerndal E (2012). Chemical-looping combustion of solid fuels – Operation in a 10 kW unit with two fuels, above-bed and in-bed fuel feed and two oxygen carriers, manganese ore and ilmenite. Fuel 102 808-822. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2012.05.010>

Liu L, Li Z, Wang L, Zhao Z, Li Y, Cai N (2020). MgO–Kaolin-Supported Manganese Ores as Oxygen Carriers for Chemical Looping Combustion. American Chemical Society - Ind. Eng. Chem. Res. 59 7238–7246. DOI: <https://10.1021/acs.iecr.9b05267>

Liu X, Li L, Zhou Z, Sun Z, Duan L (2023). Oxygen uncoupling behaviour for ilmenite ore oxygen carrier generated from a calcination treatment mixed with natural manganese ore. Can J Chem Eng. 101:805–818. DOI: <https://10.1002/cjce.24432>

Ma Z, Lu Y, Zhu L, Zhang H (2022). Synergistic effect of Ce-Mn on cyclic redox reactivity of pyrite cinder for chemical looping process. Fuel 324 124584. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124584>

- Matzen M, Pinkerton J, Wang X, Demirel Y (2017). Use of natural ores as oxygen carriers in chemical looping combustion: A review. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 65 1 – 14. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijggc.2017.08.008>
- Mendiara T, de Diego LF, García-Labiano F, Gayán P, Abad A, Adánez J (2014). On the use of a highly reactive iron ore in Chemical Looping Combustion of different coals. *Fuel* 126 239 – 249. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2014.02.061>
- Mei D, Soleimanisalim AH, Lyngfelt A, Leion H, Linderholm C, Mattisson T (2022). Modelling of gas conversion with an analytical reactor model for biomass Chemical looping combustion (bio-CLC) of solid fuels. *Chemical Engineering Journal* 433 133563. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.133563>
- Mei D, Mendiara T, Abad A, de Diego LF, García-Labiano F, Gayan P, Adánez J, Zhao H (2015). Evaluation of Manganese Minerals for Chemical Looping Combustion. *Energy Fuels* 29, 6605–6615. DOI: <https://10.1021/acs.energyfuels.5b01293>
- Mineral commodity summaries (2022). U.S. Geological Survey, 202.p. DOI: <https://doi.org/10.3133/mcs2022>
- Nandy A, Loha C, Gu S, Sarkar P, Karmakar MK, Chatterjee PK (2016). Present status and overview of Chemical Looping Combustion technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 59 597 – 619. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.003>
- Nascimento RF, Ávila MF, Taranto OP, Kurozawa LE (2022). Agglomeration in fluidized bed: Bibliometric analysis, a review, and future perspectives. *Powder Technology* 406 117597. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117597>
- Nascimento RAB, Medeiros RLBA, Costa TR, Oliveira AAS, Macedo HP, Melo MAF, Melo DMA (2020). Mn/MgAl₂O₄ oxygen carriers for chemical looping combustion using coal: influence of the thermal treatment on the structure and reactivity. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 140 2673–2685. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10973-019-09014-w>
- Nascimento RAB (2019). Minérios de ferro do brasil como transportadores de oxigênio para aplicação em processos de combustão com recirculação química. Dissertação: Mestrado. UFRN – CCET – PPGCEM, Natal, 106f.: il.
- Nunes LJR (2023). The Rising Threat of Atmospheric CO₂: A Review on the Causes, Impacts, and Mitigation Strategies. *Environments* 10(4), 66. DOI: <https://doi.org/10.3390/environments10040066>
- Pérez-Vega R, Abad A, Izquierdo MT, Gayán P, de Diego LF, Adánez J (2019). Evaluation of Mn-Fe mixed oxide doped with TiO₂ for the combustion with CO₂ capture by Chemical Looping assisted by Oxygen Uncoupling. *Applied Energy* 237 822 – 835. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.12.064>

- Pimenta AA, Portela ARMR, Oliveira CB, Ribeiro RM (2017). A bibliometria nas pesquisas acadêmicas. *Scientia*, v. 4, n. 7, p. 1-13. Available at: <https://archive.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf>. Accessed: 16 jun. 2022.
- Rotili LB, Baggio DK, Grzybovski D, Thesing NJ. Publications on spirituality in the workplace from 1998 to 2017: a bibliometric study at web of science database. *HOLOS*, [S. l.], v. 5, 2022. DOI: 10.15628/holos.2022.7797. Disponível em: <https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/7797>. Acesso em: 16 jan. 2024.
- Rydén M, Johansson M, Cleverstam E, Lyngfelt A, Mattisson T (2010). Ilmenite with addition of NiO as oxygen carrier for chemical-looping combustion. *Fuel* 89 3533. DOI: <https://10.1016/j.fuel.2010.06.010>
- Sarshar Z, Kleitzb F, Kaliaguine S (2011). Novel oxygen carriers for chemical looping combustion: La_{1-x}Ce_xBO₃ (B = Co, Mn) perovskites synthesized by reactive grinding and nanocasting. *Energy Environ. Sci.* 4, 4258. DOI: <https://10.1039/c1ee01716k>
- Shulman A, Cleverstam E, Mattisson T, Lyngfelt A (2011). Chemical – Looping with oxygen uncoupling using Mn/Mg-based oxygen carriers – Oxygen release and reactivity with methane. *Fuel* 90 941-950. DOI: <https://10.1016/j.fuel.2010.11.044>
- Silva, AB (2024). Otimização de transportadores de oxigênio à base de manganês para recirculação química através de análise bibliométrica, aprendizado de máquinas e validação experimental. Dissertação: Mestrado. UFRN – CCET – PPGQ, Natal, 96f.: il.
- Silva, AEFA; Prado, JW; Alcântara, VC; Tonelli, DF; Pereira, JR. Public opinion: bibliometric analysis for the systematization of trends. *HOLOS*, [S. l.], v. 4, p. 2–30, 2018. DOI: 10.15628/holos.2018.6905. Disponível em: <https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/6905>. Acesso em: 15 jan. 2024.
- Sun Z, Lu DY, Ridha FN, Hughes RW, Filippou D (2017). Enhanced performance of ilmenite modified by CeO₂, ZrO₂, NiO, and Mn₂O₃ as oxygen carriers in chemical looping combustion. *Applied Energy* 195 303-315. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.03.014>
- Sundqvist S, Mattisson T, Leiona H, Lyngfelt A (2018). Oxygen release from manganese ores relevant for chemical looping with oxygen uncoupling conditions. *Fuel* 232 693-703. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.06.024>
- Tutuncu AN (2021). The Oxford Handbook of Energy Politics; Hancock, K. J., Allison, J. E., eds.: New York, cap. 2, part 1 Overview. Available at: <<https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=cmkLEAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA23&dq=fossil+fuels&ots=FmbClqD->

[8R&sig=JdCUtMmd2Y1PTFEXgC4GEjNOYQw#v=onepage&q=fossil%20fuels&f=false>.](https://doi.org/10.15628/holos.2024.17226)
Accessed: 29 jul. 2022.

Zafar Q, Abad A, Mattisson T, Geverta B, Strand M (2007). Reduction and oxidation kinetics of Mn₃O₄/Mg–ZrO₂ oxygen carrier particles for chemical-looping combustion. Chemical Engineering Science 62 6556 – 6567. DOI: <https://10.1016/j.ces.2007.07.011>

Zornoza B, Mendiara T, Abad A (2022). Evaluation of oxygen carriers based on manganese-iron mixed oxides prepared from natural ores or industrial waste products for chemical looping processes. Fuel Processing Technology 234 107313. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2022.107313>

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Silva, A. B., Maria de Araújo Melo, D., Luiz Bezerra de Araújo Medeiros, R., Araújo Barros do Nascimento Santiago, R., & Maciel dos Santos, L. (2024). APPLICATION OF MANGANESE-BASED OXIDES AS OXYGEN CARRIERS IN CHEMICAL LOOPING PROCESSES: A BIBLIOMETRIC ANALYSIS. HOLOS, 2(40). <https://doi.org/10.15628/holos.2024.17226>.

ABOUT THE AUTHORS

Arivonaldo Bezerra da Silva

Instituto Federal do Rio Grande do Norte. Graduado em Química (2014) e Matemática (2007) pela UFRN. Técnico em Alimentos pelo IFRN (2010). Pesquisador especialista em Ensino de Matemática para o Ensino Médio pela UFRN (2016). Mestre em Química (2024) pela UFRN. Técnico de Laboratório do IFRN/CN.

E-mail: arivonaldo.quimica@gmail.com

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1617-9896>

Dulce Maria de Araújo Melo

Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Graduada em Farmácia pela Universidade Federal do Ceará (1979). Mestre em Química Inorgânica pela Universidade de São Paulo (1982). Doutora em Química pela Universidade de São Paulo (1989). Professora titular do Instituto de Química da Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

E-mail: daraujomelo@gmail.com

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9845-2360>

Rodolfo Luiz Bezerra de Araújo Medeiros

Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Professor visitante do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PPGCEM) e da Faculdade de Ciência e Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). Graduado em Engenharia de Materiais pela UFRN (2011) e possui mestrado (2014) e doutorado (2014) em Ciência e Engenharia de Materiais pela mesma instituição.

E-mail: rodolfojuliz.eng@gmail.com

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3072-1250>

Rebecca Araújo Barros do Nascimento Santiago

Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Doutorado (2023) e o mestrado (2019) em Ciência e Engenharia de Materiais pela UFRN e a graduação em Bacharelado em Química do Petróleo pela mesma instituição (2016).

E-mail: rebeccaabn@hotmail.com

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4185-9802>

Lamara Maciel dos Santos

Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Bacharel em Química pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (2018). Mestre em Química com ênfase em Química Inorgânica e Catálise pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (2020). Pesquisadora e bolsista em nível de doutorado no Programa de Pós-Graduação em Química da Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

E-mail: lamaramaciel@gmail.com

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0005-6440-931X>

Editor: Francinaide de Lima Silva Nascimento

Ad Hoc Reviewer: Helayne Sousa e José Fábio França Orlanda



Submitted April 16, 2024

Accepted July 2, 2024

Published July 17, 2024