



C A P Í T U L O 1 1

ANÁLISE DE UM TRANSPORTADOR DE OXIGÉNIO PARA APLICAÇÃO NA TÉCNICA DE COMBUSTÃO POR RECIRCULAÇÃO QUÍMICA UTILIZANDO O GÁS NATURAL COMO COMBUSTÍVEL

Jeniffer Bomfim da Silva

Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Rebecca Araújo Barros do Nascimento

Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Gineide Conceição dos Anjos

Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Willian Alber da Silva Farias

Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Dulce Maria de Araújo Melo

Universidade Federal do Rio Grande do Norte

RESUMO: O dióxido de carbono (CO_2) é o principal gás de efeito estufa, com impacto direto nas mudanças climáticas devido à sua elevada permanência na atmosfera. A dependência global de combustíveis fósseis, como o petróleo, intensifica as emissões de CO_2 , exigindo tecnologias eficazes para mitigação. Nesse cenário, a Captura e Armazenamento de Carbono (CCS) destaca-se como solução estratégica, com a Combustão com Recirculação Química (CLC) ganhando relevância por viabilizar a captura inerente de CO_2 a custos reduzidos. A eficiência dessa técnica, entretanto, depende criticamente do desenvolvimento de materiais otimizados para atuarem como transportadores de oxigênio (TO), o que justifica a investigação de minérios naturais abundantes e economicamente viáveis. Este estudo visa avaliar o potencial de um minério à base de ferro como transportador de oxigênio no processo de CLC, com foco na eficiência de conversão do combustível em CO_2 e H_2O e na estabilidade do material em condições operacionais. Foram realizadas caracterizações estruturais e físico-químicas do minério selecionado por meio de técnicas como Fluorescência de Raios X (FRX), Difração de Raios X (DRX), ensaios de resistência mecânica, picnometria, Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia de Dispersão de Energia (EDS). Os resultados preliminares indicam que o minério à base de ferro apresenta

características promissoras para aplicação em CLC, incluindo alta capacidade de transferência de oxigênio e estabilidade térmica. Isso sugere sua viabilidade como alternativa sustentável e de baixo custo para processos de CCS, alinhando-se às demandas por soluções energéticas eficientes e ambientalmente responsáveis.

PALAVRAS-CHAVE: Dióxido de carbono, Captura e Armazenamento de Carbono, Combustão por Recirculação Química, Transportadores de oxigênio, Minérios.

INTRODUÇÃO

O processo de CLC se destaca como uma tecnologia promissora para usinas de energia e aplicações industriais, oferecendo captura inerente de CO₂. Essa tecnologia apresenta potencial significativo para a indústria de petróleo e gás, podendo substituir sistemas convencionais de captura de CO₂ em aquecedores e caldeiras, contribuindo para a redução de emissões de gases de efeito estufa (Matzen *et al.*, 2017).

Atualmente, o mundo enfrenta o desafio de equilibrar a crescente demanda energética com a mitigação dos impactos ambientais associados à queima de combustíveis fósseis. Nesse contexto, o Brasil, como um dos maiores produtores de petróleo e gás natural, desempenha papel estratégico no cenário energético global. Além disso, o país possui alto potencial para implementar soluções tecnológicas inovadoras que aliam sustentabilidade e eficiência energética, como a CLC, reforçando sua contribuição para a transição energética e a descarbonização (Adanez *et al.*, 2012).

Conforme ilustrado na Figura 1, a CLC baseia-se na transferência de oxigênio do ar para o combustível mediante um transportador de oxigênio (TO), eliminando o contato direto entre ambos. Para viabilizar esse processo, é essencial que o oxigênio seja transferido eficientemente por meio do TO. Os materiais mais adequados para essa função são sólidos metálicos, geralmente óxidos metálicos, devido à sua estabilidade termodinâmica e eficiência na transferência de oxigênio (Johansson *et al.*, 2004).

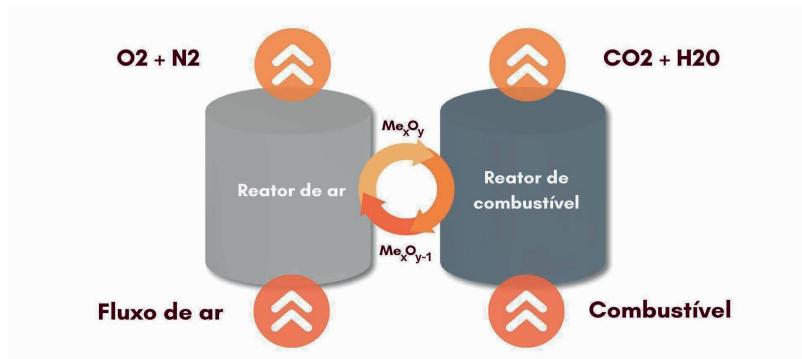


Figura 1 – Esquema do processo de CLC (2025).

A seleção adequada do TO é crucial para o desempenho da CLC. Esse material é responsável pela transferência de oxigênio entre os reatores, viabilizando a geração de energia por combustão. Para uma escolha eficaz, o TO deve possuir características específicas: alta reatividade com o combustível, capacidade de convertê-lo em CO₂ e H₂O, elevada capacidade de transporte de oxigênio, baixa tendência ao atrito e aglomeração, estabilidade térmica, resistência à deposição de carbono, segurança ambiental e baixo custo (Matzen *et al.*, 2017).

Minérios à base de ferro destacam-se como materiais atrativos para a CLC, devido ao custo reduzido, baixa toxicidade e segurança ambiental. Entretanto, a capacidade de transporte de oxigênio (Ro) do Fe₂O₃ é relativamente baixa comparada a óxidos de níquel e cobre. Contudo, essa capacidade aumenta significativamente com o grau de redução do material: o Ro do Fe₂O₃ é, em média, 0,10, podendo atingir valores até dez vezes superiores quando totalmente reduzido (Adanez *et al.*, 2012). Nesse contexto, a pesquisa foca nas características do minério, como reatividade, capacidade de conversão térmica e transporte de oxigênio, para determinar sua eficiência no processo e sua viabilidade para reduzir as emissões de CO₂ e melhorar a eficiência energética na CLC.

OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo avaliar o minério de ferro como transportador de oxigênio no processo de Combustão com Recirculação Química (CLC).

METODOLOGIA

O material utilizado como TO foi um minério à base de ferro, fornecido pela Companhia Siderúrgica do Pecém (CSP), localizada no Ceará, Brasil. Sua seleção baseou-se em critérios de abundância regional, baixo custo e segurança ambiental, aliados ao potencial termodinâmico para transferência de oxigênio, conforme estabelecido em estudos prévios com óxidos metálicos (Adanez *et al.*, 2012). Para preparação do material, o minério foi inicialmente submetido a moagem em moinho de martelos, seguida de peneiramento para obtenção de granulometria controlada entre 100 e 300 µm, visando homogeneidade nas reações e minimização de efeitos de transferência de massa (Matzen *et al.*, 2017).

Os ensaios experimentais foram conduzidos no Laboratório de Tecnologia Ambiental (LabTam), vinculado ao Instituto de Química da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). As caracterizações físico-químicas incluíram técnicas consolidadas para avaliação de propriedades críticas ao desempenho do TO no processo de CLC. A Tabela 1 apresenta as técnicas de caracterização, condições experimentais e parâmetros analíticos utilizados para avaliar o minério de ferro em estudo.

Técnica	Objetivo	Equipamento	Parâmetros	Preparação
FRX	Análise quantitativa da composição química do minério.	Shimadzu Rayny 720	500 mg de amostra em porta-amostra de polietileno.	Deposição da amostra em suporte específico.
DRX	Identificação das fases cristalinas presentes no minério.	Difratômetro Shimadzu XDR-7000	- Radiação de cobre (Cu-K α): 30 kV e 30 mA. - Varredura: 10° a 90°. - Passo: 0,02°.	Amostra pulverizada e posicionada no porta-amostras.
Resistência Mecânica	Avaliar a resistência do TO a choques em leito fluidizado.	Dinamômetro Nidec FGV-5XY	- 20 medições. - Resultados expressos em Newton (N).	Partículas na faixa granulométrica de 100–300 μm .
Picnometria	Determinar volume e densidade das partículas.	Picnômetro a gás AccuPycill 1340	- 10 ciclos de medição. - Temperatura ambiente.	Amostra seca e granulometria controlada (100–300 μm).
MEV	Analizar características morfológicas (textura, forma, dimensões).	Tescan VEGA LMU	- Feixe de elétrons contínuo. - Vácuo e metalização com ouro.	Amostra metalizada com ouro para condução superficial.
EDS	Identificar elementos químicos na superfície das partículas.	Acoplado ao MEV Tescan VEGA LMU	- Feixe de elétrons interagindo com a amostra. - Detecção de raios X característicos.	Mesma preparação do MEV.

Tabela 1 – Técnicas de caracterização, parâmetros experimentais e objetivos analíticos do TO (2025).

Esta abordagem metodológica, alicerçada em normas técnicas e equipamentos de precisão garantem a replicabilidade do estudo e fornecem subsídios para discussão segmentada dos resultados, articulando dados de composição, estrutura e desempenho funcional do TO.

RESULTADOS

A técnica de FRX foi utilizada para determinar a composição elementar do minério, permitindo a identificação e quantificação precisa dos elementos presentes na amostra. Esses dados são cruciais para a caracterização química do material e para a avaliação de sua adequação como TO.

Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 2, onde as concentrações de cada elemento são expressas em porcentagem. As informações fornecidas por essa análise são essenciais para entender como a presença e a proporção dos elementos podem impactar o desempenho e a estabilidade do minério durante o processo de CLC, influenciando diretamente a eficiência do material como TO.

Elementos	%
Fe ₂ O ₃	80,51
SiO ₂	19,01
MnO	0,189
CaO	0,097

Tabela 2 – Composição química do minério de ferro (2025).

Os resultados obtidos por FRX indicam que o minério apresenta uma elevada concentração de ferro (Fe), uma baixa concentração de silício (Si) e uma quantidade mínima de impurezas. Essas características são favoráveis para o uso do minério como transportador de oxigênio no processo de CLC, pois o ferro, na forma de óxidos, desempenha um papel central na transferência de oxigênio.

Conforme afirmado por Deng *et al.* (2018), os transportadores de oxigênio podem ser divididos em três categorias, com base em sua composição e função: fases ativas, suportes inertes e aditivos. No caso do minério estudado, a principal fase ativa é o óxido de ferro (Fe₂O₃), responsável pelo armazenamento e pela liberação de oxigênio durante o ciclo de combustão.

Os suportes inertes, como o dióxido de silício (SiO₂), têm um papel significativo na estabilização da reatividade do óxido de ferro em atmosferas redutoras. Além disso, esses compostos ajudam a melhorar a resistência mecânica do material, pois auxiliam na manutenção da estrutura porosa do minério durante as altas temperaturas do processo, e a presença controlada de SiO₂ contribui para aumentar a durabilidade e o desempenho do transportador de oxigênio ao longo dos ciclos de reação.

Observa-se na Figura 2 o difratograma de DRX do minério, possibilitando a identificação das fases cristalinas presentes e a análise de seu comportamento estrutural. As variações observadas nos picos de difração são fundamentais para avaliar a estabilidade e a reatividade do material, fornecendo informações cruciais sobre as transformações que ocorrem no minério durante os processos térmicos e reacionais. Essas mudanças podem influenciar diretamente a eficiência do minério como transportador de oxigênio no processo de CLC.

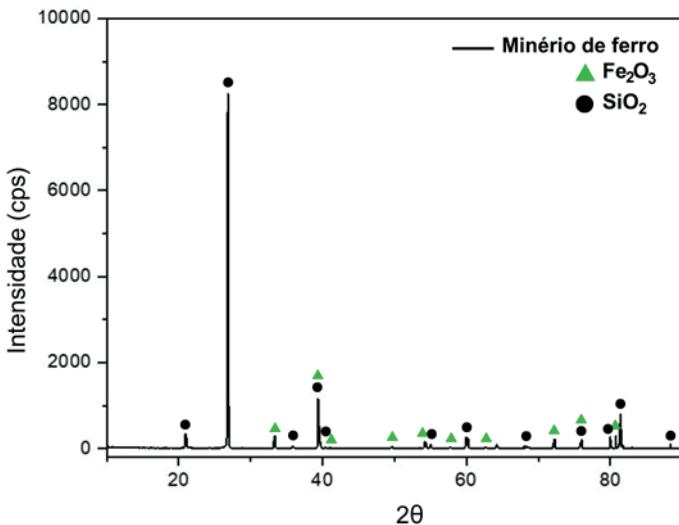


Figura 2 – Imagem do difratograma do minério (2025).

O difratograma apresenta as fases predominantes de hematita (Fe_2O_3) e sílica (SiO_2), o que é consistente com os dados obtidos pelo FRX. Além disso, a análise indica a ausência de silicatos de ferro, confirmando o comportamento inerte da sílica. Este componente inerte é fundamental para a estabilidade do TO, pois auxilia na preservação da estrutura porosa do material em altas temperaturas, promovendo uma reatividade mais eficiente durante o processo de CLC.

É fundamental que o minério possua resistência mecânica suficiente para suportar os choques durante o processo de CLC, além de resistir ao estresse gerado pelas reações redox cíclicas em altas temperaturas. Partículas com resistência inferior a 1N são consideradas extremamente frágeis e inadequadas para uso em unidades de CLC (Pérez Vega et al., 2018). Por outro lado, materiais à base de minério de ferro demonstram alta resistência mecânica, com força de esmagamento superior a 2N, o que os torna apropriados para a aplicação no processo de CLC (Johansson et al., 2004).

Na Tabela 3, é possível observar o resultado do ensaio de resistência mecânica, que apresentou um valor de 4,60 N. Este valor é superior ao mínimo recomendado pela literatura, indicando que o minério possui resistência mecânica adequada para ser utilizado no processo de CLC.

Transportador de oxigênio	Minério de ferro
Resistência mecânica (N)	4,60
Desvio padrão	1,50

Tabela 3 – Dados de resistência mecânica do minério de ferro (2025).

A Tabela 4 ilustra os resultados obtidos por picnometria do minério de ferro, fornecendo informações sobre a densidade e o volume das partículas. A análise desses parâmetros é essencial para avaliar a viabilidade do material em condições operacionais, uma vez que a densidade influencia diretamente a eficiência do transporte de oxigênio e a estabilidade do material.

Transportador de oxigênio	Minério de ferro
Densidade (g/cm ³)	4,57
Volume (cm ³)	3,68

Tabela 4 – Dados da picnometria (2025).

Para a aplicação do minério na técnica, é crucial que o material seja capaz de suportar as condições operacionais dos reatores de leito fluidizado. Nessa técnica, utiliza-se uma amostra de 50 mg para as análises no reator, e o volume das partículas desempenha um papel fundamental nesse processo. Além disso, é desejável que o minério não possua uma densidade excessiva, pois uma alta densidade pode prejudicar a fluidez do material, dificultando sua circulação eficiente entre os dois reatores e comprometendo o desempenho do processo de CLC. Portanto, a densidade das partículas é um parâmetro essencial para garantir a eficácia no transporte de oxigênio e a movimentação contínua das partículas dentro do sistema. Com base nessas considerações, é possível considerar que o minério apresenta características favoráveis em termos de volume, densidade e resistência mecânica.

A Figura 3 apresenta as imagens obtidas por MEV, nas quais é possível observar uma uniformidade nas formas das partículas do minério, embora com algumas variações. Essa uniformidade na distribuição das partículas é de grande importância, pois afeta diretamente o tamanho da área superficial das partículas e, consequentemente, a capacidade de transporte de oxigênio. Uma distribuição uniforme possibilita que o minério maximize sua eficácia como transportador de oxigênio.

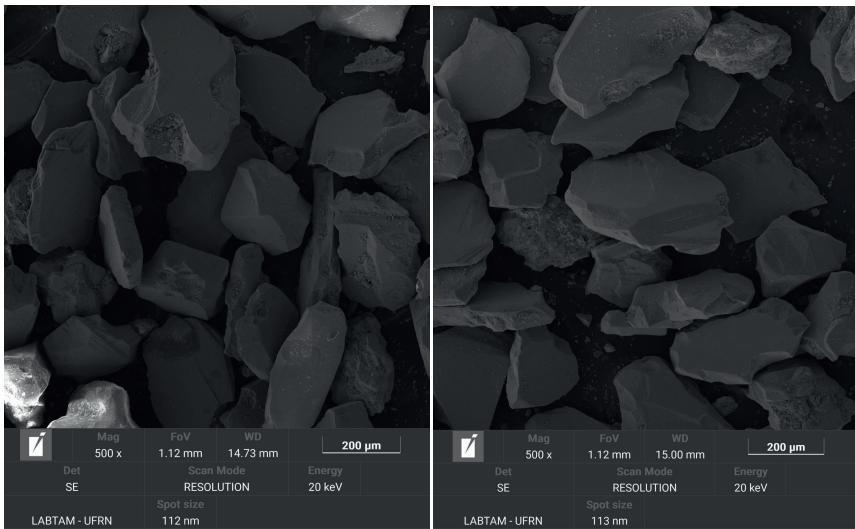


Figura 3 – Imagem das partículas do minério por MEV (2025).

Juntamente com a análise por MEV, foi realizado o EDS na região selecionada, conforme mostrado na Figura 4. Os resultados obtidos confirmaram o alto teor de ferro na amostra, validando a composição esperada para o material analisado. Essa confirmação é essencial para garantir que o minério possui as características químicas adequadas para sua aplicação como transportador de oxigênio no processo de CLC.



Figura 4 – Imagem região analisada via EDS (2025).

A análise revelou que a partícula apresenta predominância de ferro, com a presença de pequenas áreas em verde correspondendo ao manganês (Mn), em azul ao silício (Si) e em vermelho ao oxigênio (O). Esses resultados confirmam a composição heterogênea da amostra, evidenciando a distribuição dos elementos na região analisada. A visualização completa desse resultado pode ser observada na Figura 5.

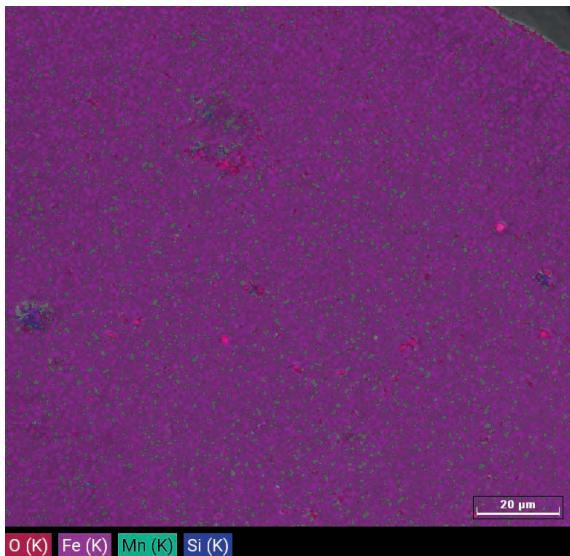


Figura 5 – Imagem região analisada via EDS (2025).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nos últimos dez anos, a CLC tem se destacado como uma solução promissora para a captura de CO₂ e geração de energia de maneira sustentável. O desenvolvimento de combustíveis e transportadores de oxigênio tem sido um foco importante nesse processo, com estudos significativos sobre a seleção e otimização desses materiais, ajudando a aprimorar a técnica e adaptá-la a diferentes condições operacionais.

Este estudo demonstrou que o minério de ferro tem grande potencial como transportador de oxigênio. Sua abundância, baixo custo e a possibilidade de regeneração fazem dele uma opção interessante para processos industriais de CLC. Além disso, a pesquisa sobre outros minérios e óxidos metálicos abre novas possibilidades para criar materiais ainda mais eficientes, com melhor estabilidade térmica, maior capacidade de transporte de oxigênio e menor formação de depósitos de carbono.

Embora os avanços sejam notáveis, a implementação em grande escala da CLC ainda enfrenta obstáculos, como a durabilidade dos transportadores, a otimização da dinâmica dos reatores e a viabilidade econômica comparada com tecnologias convencionais. No entanto, os progressos indicam que a tecnologia oferece benefícios importantes, como a separação eficiente do CO₂, maior eficiência energética e a possibilidade de integração com sistemas industriais existentes.

Dessa forma, a CLC surge como uma alternativa tecnológica promissora para o futuro da energia. Com investimentos contínuos em pesquisa e desenvolvimento, essa tecnologia pode ser fundamental para reduzir as emissões de carbono, diversificar a matriz energética e impulsionar a transição para uma economia mais sustentável.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADANEZ, J.; ABAD, A.; GARCIA-LABIANO, F.; GAYAN, P.; DE DIEGO, L. F. Progress in Chemical-Looping Combustion and Reforming technologies. **Progress in energy and combustion science**, v. 38, n. 2, p. 215–282, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2011.09.001>

DENG, G.; LI, K.; GU, Z.; ZHU, X.; WEI, Y.; CHENG, X.; WANG, H. Synergy effects of combined red muds as oxygen carriers for chemical looping combustion of methane. **Chemical Engineering Journal**, v. 341, p. 588-600, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.02.072>

JOHANSSON, Marcus; MATTISSON, Tobias; LYNGFELT, Anders. Investigation of Fe₂O₃ with MgAl₂O₄ for chemical-looping combustion. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 43, n. 22, p. 6978-6987, 2004. <https://doi.org/10.1021/ie049813c>

MATZEN, M.; PINKERTON, J.; WANG, X.; DEMIREL, Y. Use of natural ores as oxygen carriers in chemical looping combustion: A review. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, v. 65, p. 1-14, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2017.08.008>

PÉREZ-VEGA, R.; ABAD, A.; GARCÍA-LABIANO, F.; GAYÁN, P.; DE DIEGO, L. F.; IZQUIERDO, M. T.; ADÁNEZ, J. Chemical Looping Combustion of gaseous and solid fuels with manganese-iron mixed oxide as oxygen carrier. **Energy Conversion and Management**, v. 159, p. 221-231, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.01.007>

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro por meio do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC), que viabilizou o desenvolvimento deste trabalho. Expresso também minha gratidão à minha orientadora, Dulce Maria de Araújo Melo e a coorientadora, Rebecca Araújo Barros, cujo apoio e direcionamento foram fundamentais ao longo de toda a pesquisa.