

# IMPORTÂNCIA DO CALCIUM LOOPING NO SETOR DE PETRÓLEO E GÁS NATURAL

Mariana Foletto dos Santos<sup>1</sup>  
Gretta Larisa Aurora Arce Ferrufino<sup>2</sup>  
Ivonete Ávila<sup>3</sup>

## RESUMO

As mudanças climáticas provocadas pelas emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) estão piorando a cada ano, e uma das fontes dessas emissões, os combustíveis fósseis, vão continuar a ser usados num futuro próximo. Assim, é necessário encontrar tecnologias, como o *Calcium Looping* (CaL) são viáveis econômica e ambientalmente, e aplicá-las em usinas que fazem uso de petróleo, gás natural e carvão. Assim, foi feito um estudo bibliográfico que mostrem aplicações de CaL em usinas que emitem CO<sub>2</sub> de combustíveis fósseis, encontrando como respostas pontos positivos para o meio ambiente, e pontos negativos, que com pesquisa e desenvolvimento correto, possa vir a solucionar os desafios atualmente encontrados neste processo. Tornando assim, o processo CaL uma tecnologia cada vez mais viável em ser aplicada na redução das emissões de CO<sub>2</sub> no setor petróleo, gás natural e biocombustíveis.

**Palavras-chave:** Calcium Looping, dióxido de carbono, combustíveis fósseis, captura.

## INTRODUÇÃO

Há um aumento considerável da quantidade de dióxido de carbono que têm sido lançado para a atmosfera, que por consequência provocou um aumento anual de 0,85°C na temperatura média da Terra (ANDRADE, 2016). O aumento de temperatura, por mais pequeno que possa parecer, traz diversas mudanças no planeta, como aumento do nível do mar e sua temperatura, chuvas torrenciais e contribui para desastres naturais acontecerem. Segundo a Curva de Keeling, em fevereiro de 2021 a concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera terrestre era de 415,11 ppm (KEELING et al., 2001).

Parte desse CO<sub>2</sub> emitido provém da queima dos combustíveis fósseis, e segundo dados do Balanço Energético Nacional (BEN), no Brasil, o petróleo é a principal fonte de produção

---

<sup>1</sup> Graduanda do Curso de Engenharia de Materiais da Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita” – UNESP, bolsista do Programa PRH 34.1 ANP/FINEP, [mariana.foletto@unesp.br](mailto:mariana.foletto@unesp.br);

<sup>2</sup> Pós-doutor: Laboratório de combustão e captura de carbono (LC<sub>3</sub>) da Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita” – UNESP, [gretta.arce@unesp.br](mailto:gretta.arce@unesp.br);

<sup>3</sup> Orientador: Prof. Dra, Laboratório de combustão e Captura de carbono (LC<sub>3</sub>) da Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita” – UNESP, [iavila@unesp.br](mailto:iavila@unesp.br).

de energia primária, atingindo a produção total de  $144,3 \times 10^6$  em 2019 (BEN, 2021). Seguindo o mesmo aumento de produção, os derivados de petróleo também são as principais fontes do consumo de energia no Brasil, e em 2019, o consumo final nacional foi de  $102,2 \times 10^6$  tep, sendo um consumidor o setor de energia, que utilizou 11,9% da energia brasileira, utilizando principalmente gás natural e petróleo, havendo um aumento desse último entre 2018 e 2019 (BEN, 2021). Esse aumento no uso de combustíveis fósseis é uma estimativa para os próximos anos, por isso é necessário a redução e contenção das emissões de  $\text{CO}_2$ .

A Captura e Armazenamento de Carbono (CCS) é uma tecnologia com essa função, sendo econômica e viável ambientalmente, e a captura ou separação de  $\text{CO}_2$  pode ser acoplada aos seguintes processos: pré-combustão, pós-combustão e oxí-combustão. A pré-combustão e pós-combustão são as mais interessantes entre as três para ter a aplicação das tecnologias CCS, e dentre as tecnologias de pré-combustão e pós-combustão está o *Calcium Looping* (CaL) (SILVA, 2018).

Para capturar e purificar o  $\text{CO}_2$ , o CaL faz uso de ciclos de carbonatação e calcinação, usando o mesmo material a base de  $\text{CaO}$  durante vários ciclos, podendo armazenar ou utilizar o  $\text{CO}_2$  posteriormente. Para dar início ao ciclo CaL, o gás de combustão entra no carbonatador, onde um sorvente a base de  $\text{CaO}$  reage com o  $\text{CO}_2$  presente, formando o  $\text{CaCO}_3$ . Logo após, ocorre a calcinação, acontecendo no calcinador em altas concentrações de  $\text{CO}_2$  e altas temperaturas, tendo a regeneração das partículas de  $\text{CaO}$ . Por fim, essas partículas são recicladas no carbonatador, e o  $\text{CO}_2$  é extraído em alta concentração do calcinador (BENITEZ-GUERRERO et al., 2018). Porém, após diversos ciclos ocorre um inadequado desempenho dos sorvente minerais utilizados (ERANS et al., 2016).

Mesmo sendo fontes não renováveis, ainda há muitos combustíveis fósseis para serem explorados e utilizados ao longo dos próximos anos. Por conta disso, tecnologias como o *Calcium Looping* se fazem cada mais necessárias para serem implementadas no setor energético. Assim, o objetivo desse artigo em questão é analisar estudos de captura de  $\text{CO}_2$  de combustíveis fósseis (petróleo, gás natural ou carvão mineral) por meio do *Calcium Looping*. Para isso, foram encontrados cinco diferentes artigos em banco de pesquisas, para melhor analisar a aplicação do *Calcium Looping* nas usinas que fazem uso de combustíveis fósseis. Dos cinco artigos, apenas um apresentou resultados extremamente positivos para o CaL, e sua aplicação. Os outros mostraram ótimo impacto na mudança climática (atingindo numa simulação 75% de redução), entretanto, ainda apresentaram um elevado custo financeiro, o que dificulta sua utilização em nível industrial. Por isso, é necessário realizar mais pesquisas e

novos desenvolvimentos para que o *calcium looping* ganhe cada vez mais destaque e possa ser implementado em grande escala.

## METODOLOGIA

Para a realização da revisão bibliográfica, utilizou-se a base de dados científicos “*Science Direct*”. No campo de pesquisa, foi colocado as palavras chaves: “*calcium looping*”, “*natural gas*”, “*oil*”, “*fossils fuels*”, e “*petroleum*”, limitando a artigos publicados entre 2016 e 2021. Para melhor complementação da revisão, utilizou-se também o banco de pesquisas “*Scholar Google*” e “*Research Gate*”, fazendo-se o uso dos mesmos filtros de pesquisa.

## REFERENCIAL TEÓRICO

O Efeito Estufa é um fenômeno natural que ocorre na atmosfera da Terra, devido a presença de vapor d’água, dióxido de carbono e metano. Tais gases possuem a propriedade de serem transparentes à radiação visível oriunda do Sol, e são parcialmente opacos à radiação infravermelha (calor) emitida pela superfície planetária (ANDRADE, 2016). Essas propriedades dos gases estufa permitem que parte do calor emitido da Terra seja absorvido e reemitido em todas as direções, causando à baixa troposfera, um aumento de temperatura (ANDRADE, 2016). Se a atmosfera terrestre não tivesse a presença dos gases estufa, a temperatura média da superfície seria de  $-18^{\circ}\text{C}$ , e não de  $15^{\circ}\text{C}$  como é atualmente (ANDRADE, 2016).

Entretanto, por mais benéfico que o efeito estufa possa ser, com a atividade humana, a quantidade de gases estufas que vem sendo lançados para a atmosfera, principalmente o  $\text{CO}_2$ , tem crescido dramaticamente, provocando um aumento anual de  $0,85^{\circ}\text{C}$  na temperatura média da Terra, conhecido como aquecimento global (ANDRADE, 2016). Essa mudança de temperatura traz consigo modificações no clima em diversas regiões do planeta, que acabam gerando impactos danosos, como chuvas torrenciais, inundações, aumento do nível do mar e de sua temperatura, e também contribui para o acontecimento de desastres naturais.

A Curva de Keeling é o gráfico que contabiliza o  $\text{CO}_2$  na atmosfera terrestre, por meio de medições realizadas no Observatório Mauna Loa localizado na ilha do Havaí (KEELING et al., 2001). E na Figura 1, a curva mostra as medições até fevereiro de 2021, chegando a atingir em torno de 415,11 ppm (KEELING et al., 2001), um número alarmante.

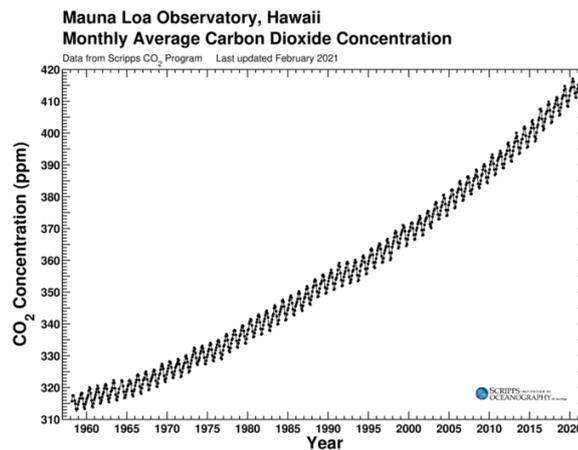


Figura 1. Curva Keeling até fevereiro de 2021.  
 Fonte: adaptado de (C. D. Keeling, 2001).

Segundo a Organização Meteorológica Mundial (OMM) a diminuição do ritmo industrial e recessão mundial do primeiro semestre de 2020, devido à pandemia do COVID-19 não ocasionou redução dos níveis de gases do Efeito Estufa (GEE). Devido ao surto de crescimento de emissões do CO<sub>2</sub> em 2019, a concentração continuou aumentando em 2020 (ECODEBATE, 2020). As quarentenas ajudaram a reduzir as emissões de poluentes dos GEEs, entretanto, o impacto nas concentrações de CO<sub>2</sub> na atmosfera não foi significativamente percebido.

Segundo dados do Balanço Energético Nacional (BEN), na produção de energia primária no Brasil, o Petróleo se sobressai em relação as outras desde 1990, e é notável o crescimento que essa produção possui, sendo que em 2019, a produção total foi de  $144,3 \cdot 10^6$  tep, muito mais que a de outras energias, enquanto a produção de Gás Natural, outro combustível fóssil, foi de  $40,8 \cdot 10^6$  tep no mesmo ano (BEN, 2021).

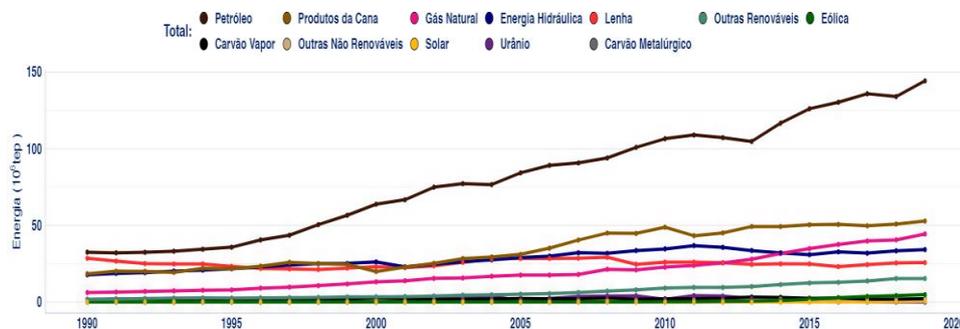


Figura 2. Produção de Energia primária no Brasil.  
 Fonte: adaptado de (Balanço Energético Mundial, 2020).

O aumento da produção de energia provinda do petróleo ao longo dos anos foi seguido também pelo aumento do consumo final no território brasileiro. Desde 1990, a maior fonte de energia consumida são os derivados de petróleo, e ao longo dos anos esses números só foram aumentando, como mostra a Figura 3 abaixo. No ano de 2019, o consumo final por fonte de derivados de petróleo chegou a  $102,2 \times 10^6$  tep (BEN, 2021).

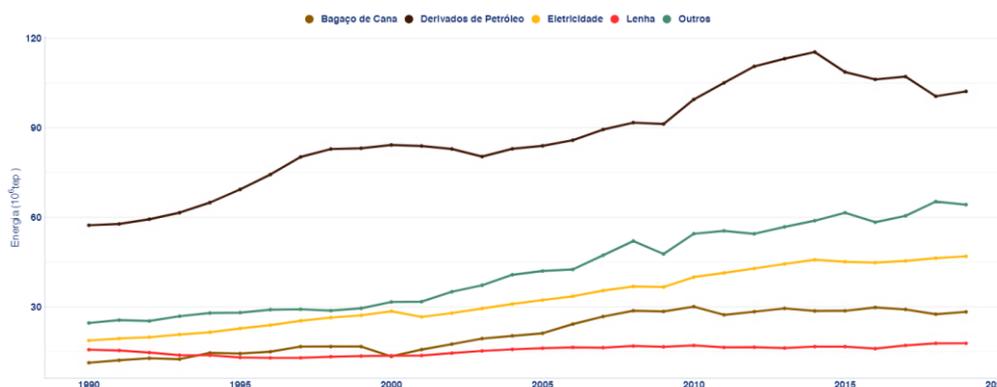


Figura 3. Consumo final nacional por fonte.  
Fonte: adaptado de (Balanço Energético Mundial, 2020).

Olhando outros dados do BEN, em 2019, 53,9% das fontes de energias utilizadas no Brasil foram de fontes não renováveis, sendo a de maior quantidade, o petróleo e seus derivados com 34,4% (BEN, 2021). Em 2019, o setor energético utilizou 11,9% da energia brasileira, aumentando 1,4% em relação ao ano anterior. Entre as fontes utilizadas para o consumo energético, o gás natural ocupa o segundo lugar, com uma diminuição de uso entre os anos de 2018 e 2019, enquanto que para o petróleo e seus derivados (ocupando a terceira posição) houve um aumento de 2,2% da quantidade usada em 2019 com relação ao ano anterior (BEN, 2021).

Essa tendência de aumento do uso de combustíveis fósseis (petróleo, gás natural, carvão mineral), tem estimativa de continuar aumentando nos próximos anos, em especial porque suportam diversos setores relevantes para indústrias e também movimentam a economia, não só brasileira, mas ao redor do mundo.

Analisando os dados apresentados, vemos a necessidade de encontrar opções para reduzir e conter as emissões de  $\text{CO}_2$ . Uma das tecnologias conhecidas atualmente para essa função é a Captura e Armazenamento de Carbono (CCS na sigla em inglês), viável econômica e ambientalmente, em que a captura ou separação de  $\text{CO}_2$  é adaptada ou acoplada aos principais processos de combustão: pré-combustão, pós-combustão e oxi-combustão.

Na pós-combustão, há oxidação total da fonte de carbono, e emissão dos gases de combustão em altas temperaturas e pressão atmosférica (SILVA, 2018). Nesse caso, a aplicação de tecnologias CCS é mais interessante devido a simplicidade da combinação entre ambas. Na pré-combustão, o combustível é gaseificado, ocorrendo a formação de uma mistura que consiste principalmente em H<sub>2</sub>, CO, e menores quantidades de CH<sub>4</sub> e H<sub>2</sub>O, sendo feita uma reação usando vapor d'água a fim de converter CO à CO<sub>2</sub>. Ao final, tem-se uma mistura de gases em alta pressão, em que o CO<sub>2</sub> precisa ser capturado antes do H<sub>2</sub> ser utilizado em um novo processo ou etapa (SILVA, 2018). Já na oxicomcombustão, é usado oxigênio de alta pureza na queima ou biomassa, gerando um gás composto de CO<sub>2</sub> e água (SILVA, 2018).

O Calcium-Looping, é uma tecnologia de que pode ser utilizada na pré-combustão e/ou pós-combustão. Esta tecnologia é altamente promissora na redução das emissões de CO<sub>2</sub>, usando ciclos de carbonatação/calцинаção para a captura e purificação de CO<sub>2</sub>, usando o mesmo material a base de CaO durante múltiplos ciclos (ERANS et al., 2016), como mostra a Figura 4. Assim, o CO<sub>2</sub> pode ser armazenado ou utilizado posteriormente.

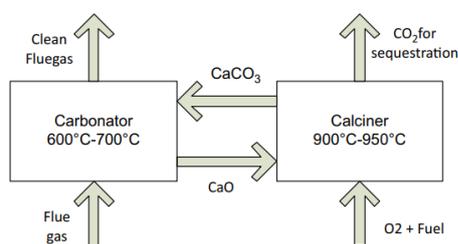
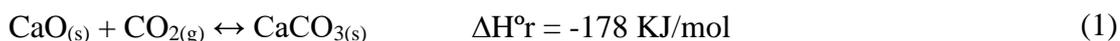


Figura 4. Diagrama do funcionamento do Calcium Looping.  
 Fonte: adaptado de (Erans et al, 2016).

O ciclo se inicia com o gás de combustão entrando no primeiro reator de leito fluidizado, chamado carbonator, em que um sorvente à base de CaO reage com o CO<sub>2</sub> presente, resultando na formação de um sorvente saturado, o CaCO<sub>3</sub> (ERANS et al., 2016). Esta reação de carbonatação ocorre a uma taxa bastante rápida, entre 580 e 700°C (BENITEZ-GUERRERO et al., 2018), e está demonstrada na equação abaixo:



Esta reação possui duas etapas: um estágio inicial, relativamente rápido, seguido por um estágio mais lento, limitado pela difusão dos reagentes (BENITEZ-GUERRERO et al., 2018), e quanto maior a temperatura de carbonatação, maior é a conversão obtida (BIASIN et al., 2015). Logo após a carbonatação, tem-se a calcinação, uma reação endotérmica, que ocorre no segundo reator, com alta concentração de CO<sub>2</sub> e temperaturas em torno de 930°C a

950°C. Há a regeneração das partículas de CaO, decorrentes das partículas de CaCO<sub>3</sub>, que pode se decompor quase totalmente, porém a taxa de reação diminui com o aumento da pressão parcial de CO<sub>2</sub>. Após a calcinação, as partículas de CaO são recicladas no carbonatador para um novo ciclo em seguida, enquanto que no calcinador, o CO<sub>2</sub> que é extraído em alta concentração, pode ser comprimido e armazenado ou utilizado em outras finalidades (BENITEZ-GUERRERO et al., 2018).

Entretanto, após múltiplos ciclos de carbonatação/calcinação, há o inadequado desempenho dos sorventes minerais utilizados no processo (BENITEZ-GUERRERO et al., 2018). Normalmente, esse inadequado desempenho é atribuído ao fenômeno de sinterização dos sorventes durante a calcinação, que provocam mudanças estruturais e morfológicas drásticas, que produzem o decaimento rápido da reatividade do sorvente, e após 15 ou 30 ciclos, a atividade residual do sorvente está entre 8 a 10% (ERANS et al., 2016). Outro motivo pode ser causado pelo atrito entre as partículas e as paredes dos reatores de leito fluidizado. E vem sendo feito diversas pesquisas de tratamentos que podem melhorar essa estabilidade, como moagem, ativação mecânica ou térmica e hidratação.

Esses sorventes minerais são à base de cálcio, que possuem ampla disponibilidade, não são tóxicos e são econômicos, por isso o *Calcium-Looping* é interessante em aplicações de larga escala, sendo a mais promissora entre todas as tecnologias CCS (BENITEZ-GUERRERO et al., 2018). Para serem utilizados, os sorventes precisam apresentar elevada capacidade de captura de CO<sub>2</sub>, e alta estabilidade, devendo suportar altas temperaturas e manter elevada a capacidade de captura durante os ciclos. O óxido de cálcio puro ou o calcário natural sem tratamento não são propícios a utilização, pois devido à perda de poros e sinterização do material, ele se desativa durante os ciclos de reação (SANTOS et. al., 2012). Assim, para aumentar a capacidade de captura do CO<sub>2</sub>, e também aumentar a estabilidade do óxido de cálcio, são feitos melhoramentos e modificações no material, adicionando materiais inertes, como Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZrO<sub>2</sub> e MgO, que podem impedir a aglomeração e o crescimento de grãos do CaO, evitando sua desativação (BENITEZ-GUERRERO et al., 2018).

Tendo conhecimento dos problemas ocasionados por combustíveis fósseis, sua crescente demanda e produção, e também que em território nacional ainda há recursos fósseis a serem explorados, a necessidade de se implementar tecnologias como o calcium looping só cresce.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após procurar nos banco de dados listados, foram selecionados cinco artigos de autores que fizeram o uso do Calcium Looping em usinas de combustíveis fósseis, listados abaixo, junto do ano de publicação:

*Tabela 1.* Autores dos artigos listados e ano de publicação.

<b>Autores</b>	<b>Ano de publicação</b>
Wei et. al. [11]	2021
Fu et. al. [12]	2021
Rolfea et. al. [13]	2018
Calin Cristian Cormos. [14]	2021
Clarens et. al. [15]	2016

Diferentemente dos outros artigos lidos, Wei et. al. (2021) fizeram o uso do Calcium Looping (CaL) para poder produzir gás natural sintético (SNG, na sigla em inglês) a partir do carvão, realizando simultaneamente a captura do CO<sub>2</sub>, porém focando no processo de simulação da obtenção do gás natural sintético por *Calcium Looping* (CaL-SNG) por meio do software ASPEN Plus. Logo após a obtenção de resultados do CaL-SNG, comparou-se com os resultados do processo Lurgi-SNG também simulado. Financeiramente, o custo total de operação na usina anualmente do CaL-SNG é mais alto, devido a desativação dos sorventes, os autores indicam que os sorventes ao terem seu desempenho melhorado poderia diminuir os custos. Entretanto, o investimento é cerca de 10,6% menor que o processo convencional. Eles também fizeram comparações de números das simulações, com o CaL-SNG se sobressaindo nos números: ele possui 6% maior eficiência em relação ao processo convencional (Lurgi-SNG), interessante a necessidade de energia é de 12,3% menor, e a quantidade de água tratada no processo é menor em 40% utilizando o processo de CaL.

Fu et. al. (2021) realizaram uma análise do CaL integrado ao Ciclo Combinado de Gás Natural (NGCC, sigla em inglês), com configurações avançadas de processo e um sorvente sintético de CaO. Eles fizeram uma avaliação de custos do processo CaL, focando na captura de CO<sub>2</sub> durante o NGCC, estudando o dimensionamento de certos equipamentos utilizados, como o carbonatador, o calcinador e o trocador de calor, para poder analisar os custos desses equipamentos, e avaliar completamente o potencial do CaL. Para melhor visão de gastos, os valores obtidos com os equipamentos de CaL também são comparados com os custos de um

NGCC com captura de CO<sub>2</sub> por meio de monoetanolamina (MEA). Para o processo com CaL, o custo foi de 86-95 euros/tCO<sub>2</sub>, e enquanto por meio de MEA, o custo foi de 49 euros/tCO<sub>2</sub>. Foi essa diferença entre valores que fez com que eles discutissem sobre o CaL não ser competitivo com o MEA no mercado de NGCC, com os dados obtidos no seu trabalho.

Rolfea et. al. (2018), por sua vez, ao invés de trabalhar com o gás natural, utilizou o CaL para capturar CO<sub>2</sub> numa usina de carvão pulverizado. Através do software ECLIPSE, foi feito um modelo do processo, para entender melhor as características de desempenho e benefício que a integração traria. A eficiência térmica com captura de CO<sub>2</sub> por CaL foi de 33,8%, um valor 7,4% abaixo ao valor obtido na usina de referência sem captura de CO<sub>2</sub>. Rolfea et. al. (2018) observaram que o custo de investimento específico foi 1778 euros/kWe (21% maior que o da usina de referência, de 1462 euros/kWe); e o custo nivelado da eletricidade (LCOE, sigla em inglês) para a usina com captura de CO<sub>2</sub> seria de 77,3 euros/MWh, e de 60,8 euros/MWh para a de referência. Através de uma simulação no software SimaPro, eles observaram o impacto que uma unidade de CaL integrada na usina traria: notaram que a ecotoxicidade marinha aumentou para 81%, devido ao aumento do uso de carvão e resíduos sólidos tratados, e houve um aumento de 22% no impacto de esgotamento fóssil. Entretanto, houve uma redução de 75% na mudança climática, e uma redução de 46% na formação de partículas em suspensão.

Cormos (2021) também fez sua avaliação da aplicação de ciclos com sorventes a base de cálcio (CaL) e de magnésio (MgL) para captura de CO<sub>2</sub> numa usina de combustíveis fósseis. Ele observou que para ambos os ciclos, houve uma penalidade menor de 2,2% de captura de carbono ao se comparar com a absorção de carbono por gás-líquido reativo, já o CaL apresentou eficiência energética de 1,4% maior com relação ao MgL. Para custos econômicos o CaL e MgL apresentaram números mais atrativos que o sistema de absorção químico (MEA), sendo menos 225-450 euros/kW em investimentos de capital, e menos 2,7-9 euros/MWh de custos de produção de eletricidade. E, entre o cálcio (CaL) e o magnésio (MgL), devido a eficiência energética melhor e custo menor do sorvente, o CaL apresentou melhor desempenho econômico.

Clarens et. al. (2016) fez uso do CaL para comparar o impacto ambiental da captura do CO<sub>2</sub> dos gases combustíveis numa usina de carvão por três tecnologias: absorção com dois processos de amina e o CaL. Após os processos, foi percebido que houve redução líquida no impacto de mudança climática (de 73%), material particulado e acidificação terrestre. As emissões de CO<sub>2</sub> com o CaL foi o de menor número (0,26 kg CO<sub>2</sub>/kWh) entre todos os

processos. Assim, Clarens et. al. (2016) concluíram que o CaL é uma alternativa viável de troca em sistemas baseados em amina, ressaltando a otimização que há entre a integração térmica do CaL com a usina, tornando esse sistema de captura ambientalmente atraente.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após análise de dados, é indiscutível que as emissões de CO<sub>2</sub> por combustíveis fósseis são prejudiciais, e necessitamos encontrar meios de reduzir e conter esse impacto no meio ambiente. O *Calcium Looping* (CaL) está ganhando destaque e se tornando cada vez mais promissora a ser instalada em níveis industriais. Fu et. al. (2021) não encontraram resultados atrativos economicamente quando estudaram o CaL nos processos de pré-combustão através do estudo nas NGCC. Wei et. al. (2021) também encontraram como ponto negativo economicamente ao utilizar o CaL para produzir gás natural sintético por meio do carvão. Ambos os autores atribuem isto ao rápido decaimento dos sorventes e indicam, que com as pesquisas e os desenvolvimentos sobre este assunto e melhoramento dos reatores com alto desempenho, esse problema possa vir a ser resolvido. O CaL implementado numa usina de carvão também trouxe custos maiores segundo a pesquisa de Rolfea et. al. (2018), que através da simulação feita no SimaPro, foram observados os impactos negativos e positivos no meio ambiente, como a redução de 75% na mudança climática. Outro que analisou o impacto ambiental na mudança climática, chegando à redução de 73% foi o Clarens et. al. (2016), usando o processo de CaL numa usina de carvão. Cormos (2021) foi o que mais obteve resultados positivos ao usar o CaL numa usina de combustíveis fósseis, tanto em eficiência energética, quanto economicamente.

Há a ressalva também de que por mais que esses estudos tenham sido feitos em indústrias de combustíveis fósseis (com foco em gás natural e carvão), o CaL pode ser aplicado em outras indústrias como de aço e cimento, trazendo resultados até mais positivos. O CaL se desenvolve cada vez mais, conforme seu número de estudos e pesquisas aumentam, e isso só aumenta a importância de encontrar a tecnologia que seja viável econômica e financeiramente para reduzir e conter as emissões de CO<sub>2</sub>, e quem sabe poder impedir um futuro pior.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Laboratório de Combustão e Captura de Carbono (LC3) e ao Programa PRH 34.1 ANP/FINEP pela oportunidade.

## REFERÊNCIAS

- [1] ANDRADE, Carlos Eduardo Sanches de. Avaliação da Emissão de Dióxido de Carbono e do uso de Energia no Ciclo de Vida de Sistemas Metroferroviários de Passageiros: Aplicação na Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro. 2016. 212 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: <http://www.ltc.coppe.ufrj.br/>. Acesso em: 28 jan. 2021.
- [2] C. D. Keeling, S. C. Piper, R. B. Bacastow, M. Wahlen, T. P. Whorf, M. Heimann, and H. A. Meijer. Exchanges of atmospheric CO<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> with the terrestrial biosphere and oceans from 1978 to 2000. I. Global aspects, SIO Reference Series, No. 01-06, Scripps Institution of Oceanography, San Diego, 88 pages, 2001.
- [3] Balanço Energético Mundial. BEN Interativo. Disponível em: <http://shinyepe.brazilsouth.cloudapp.azure.com/>. Acesso em: 04 maio 2021.
- [4] SILVA, Juliana Alves da. Captura de CO<sub>2</sub> de gases de Combustão utilizando Óxido de Cálcio. 2018. 81 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2018.
- [5] Benitez-Guerrero, M. et al. Calcium-Looping performance of mechanically modified Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaO composites for energy storage and CO<sub>2</sub> capture. *Chemical Engineering Journal*, v.334, p.2343-2355, 2018.
- [6] Erans, M. et al. Calcium looping sorbents for CO<sub>2</sub> capture. *Applied Energy*, v. 180, p. 722-742, 2016.
- [7] ECODEBATE. Concentração de CO<sub>2</sub> bate recorde em 2020 mesmo com pandemia. Disponível em: [www.ecodebate.com.br](http://www.ecodebate.com.br). Acesso em: 28 jan. 2021.
- [8] Empresa de Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional 2020. Rio de Janeiro, 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/>. Acesso em: 04 maio 2021.
- [9] BIASIN, A. et al. Investigation of CaO – CO<sub>2</sub> reaction kinetics by in-situ XRD using synchrotron radiation. *Chemical Engineering Science*, v. 127, p. 13–24, 2015.
- [10] SANTOS, E. T. et al. Investigation of a stable synthetic sol – gel CaO sorbent for CO<sub>2</sub> capture. *Fuel*, v. 94, p. 624–628, 2012.
- [11] WEI, Di et al. Process simulation and economic analysis of calcium looping gasification for coal to synthetic natural gas. *Fuel Processing Technology*, [S.L.], v. 218, p. 106835-106846, jul. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuproc.2021.106835>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/>. Acesso em: 04 maio 2021.
- [12] FU, Chao et al. Techno-Economic Analyses of the CaO/CaCO<sub>3</sub> Post-Combustion CO<sub>2</sub> Capture From NGCC Power Plants. *Frontiers In Chemical Engineering*, [S.L.], v. 2, 11 jan. 2021. Frontiers Media SA. <http://dx.doi.org/10.3389/fceng.2020.596417>. Disponível em: <https://www.researchgate.net/>. Acesso em: 04 maio 2021
- [13] ROLFE, A. et al. Integration of the calcium carbonate looping process into an existing pulverized coal-fired power plant for CO<sub>2</sub> capture: techno-economic and environmental evaluation. *Applied Energy*, [S.L.], v. 222, n. 1, p. 169-179, jul. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.160>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/>. Acesso em: 04 maio 2021.
- [14] CORMOS, Calin-Cristian. Techno-economic assessment of calcium and magnesium-based sorbents for post-combustion CO<sub>2</sub> capture applied in fossil-fueled power plants. *Fuel*, [S.L.], v. 298, p. 120794, ago. 2021. Elsevier BV.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120794>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/>.  
Acesso em: 04 maio 2021.

[15] CLARENS, Frederic et al. Life cycle assessment of CaO looping versus amine-based absorption for capturing CO<sub>2</sub> in a subcritical coal power plant. *International Journal Of Greenhouse Gas Control*, [S.L.], v. 46, n. 1, p. 18-27, mar. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijggc.2015.12.031>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/>. Acesso em: 04 maio 2021.