

PROJETO DE UM LEITO FLUIDIZADO CIRCULANTE PARA ESTUDOS SOBRE CAPTURA DE DIÓXIDO DE CARBONO POR CALCIUM-LOOPING

Gretta L. A. Arce Ferruffino¹

Renan Camargo²

Mariana Foletto dos Santos³

João A. Carvalho Jr.⁴

Ivonete Ávila⁵

RESUMO

Devido à necessidade de mitigar os efeitos das mudanças climáticas, esforços têm sido dedicados à geração de novas tecnologias para captura e armazenamento de dióxido de carbono (CO₂). O desenvolvimento de novas tecnologias com aplicadas no setor de petróleo e gás, é de extrema importância. A *Calcium Looping* (CaL) é uma tecnologia promissora não só para o sequestro de carbono mas também para purificação de gás natural e a produção de biocombustíveis (como o hidrogênio derivado de biomassa). A inserção desta tecnologia não só permitirá o uso continuado dos combustíveis fósseis na geração de eletricidade, como o uso de gás natural, mas também permitirá a produção de hidrogênio a partir de gás de síntese. No processo de CaL, o CO₂ é capturado por meio de reações gás-sólido com um sorvente de base de cálcio (CaO) durante a carbonatação. Subsequentemente, o CO₂ é liberado durante o processo de calcinação. Este processo permite o estabelecimento de um fluxo de CO₂ com alta pureza que pode ser prontamente sequestrado. O CaL é uma tecnologia que já é aplicada em várias partes do mundo, entretanto no Brasil poucas pesquisas são encontradas. O estudo deste tipo de processos não é explorado no Brasil, uma vez que é necessário o uso de Leitos Fluidizados Circulantes em escala de bancada, os quais medem pelo menos 4 metro de altura, sendo que poucos laboratórios tem este tipo de estruturas. O objetivo deste artigo é apresentar o projeto de um leito fluidizado circulante à frio para estudar a fluidodinâmica do calcário brasileiro num processo CaL.

Palavras-chave: CO₂, Calcium-Looping, Gás Natural, Captura de Carbono, leito fluidizado circulante.

INTRODUÇÃO

A matriz energética mundial ainda depende dos combustíveis fósseis os quais são relativamente baratos, assim, este cenário parece não mudar nos próximos anos sendo que o

¹ Pesquisador do Laboratório de combustão e captura de carbono (LC₃) da FEG - UNESP, gretta.arce@unesp.br;

² Graduando do Curso de Engenharia mecânica da FEG - UNESP, renan.c.oliveira@unesp.br;

³ Graduando do Curso de Engenharia de materiais da FEG - UNESP, mariana.foleto@unesp.br;

⁴ Supervisor: Prof. Dr. Departamento de Energia da FEG - UNESP, ja.carvalho@unesp.br;

⁵ Supervisor: Prof. Dra, Laboartório de combustão e Captura de carbono (LC₃), iavila@unesp.br.

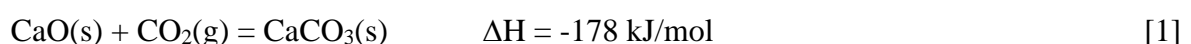
seu consumo aumentará em 37% para o ano 2040 (ERANS et al. 2016; WANG et al., 2018), portanto, é necessário encontrar opções de mitigação para as emissões de CO₂.

Dentre todas as tecnologias CCUS até agora conhecidas, o processo *calcium looping* (CaL) utilizando sorventes naturais baseados em cálcio (Ca), tais como: calcário e dolomita; é a tecnologia mais promissora para remover o CO₂ dos gases de exaustão e/ou aumentar o teor de hidrogênio (H₂) nos gases de sínteses (ZHANG et al. 2013; ERANS et al. 2016; WANG et al., 2018). Desde a primeira patente da aplicação de sorventes de CaO para captura de CO₂ pós-combustão, há quase 20 anos (HIRAMA et al., 1994), um desenvolvimento notável foi realizado, tanto no desempenho de sorventes como no uso de reatores de leito fluidizado, para provar o conceito em escala piloto na ordem de MW (ABANADES et al. 2015, ERANS et al., 2016; WANG et al. 2018). Assim, a CaL é a mais aceita tecnologicamente devido a sua adequabilidade econômica e excelente desempenho de captura de CO₂ utilizando materiais baseados em cálcio (Ca) chamados de sorventes.

Dentre todas as publicações pesquisadas na *Scopus*, o país que mostrou mais interesse foi a China com mais de 90 artigos publicados, seguida da Espanha com 70 artigos e a Itália no terceiro lugar com 50 artigos publicados até o momento. Por outro lado, o Brasil tem um único artigo publicado no ano 2019, colocando-o no lugar 23 do ranking mundial das publicações sobre este assunto.

REFERENCIAL TEÓRICO

O processo CaL é uma das mais interessantes tecnologias para a captura de carbono de segunda geração a qual remove o CO₂ dos gases de exaustão na pós-combustão e das correntes de um combustível na pré-combustão. Este processo é baseado sobre a carbonatação reversível dos sorventes (calcários e dolomitas). Em particular, o CaL, consiste num processo cíclico termoquímico, baseado na reação reversível carbonatação/calцинаção, Equação 1.



Este processo implica a utilização de dois reatores de leito fluidizados (carbonatador e calcinador). Este tipo de equipamento utilizado fez com que o nível do desenvolvimento tecnológico esteja muito avançado atingindo escalas pilotos a nível industrial (1 – 2 MWth) já demonstradas (BENITEZ-GUERRERO et al., 2018).

O processo CaL é baseado sobre iterações da captura de CO₂ pelo CaO (etapa de carbonatação geralmente conduzida em 650 – 700° C) seguido pela eliminação de CO₂ pela

decomposição de CaCO_3 (etapa de calcinação, geralmente conduzido em $850 - 950^\circ \text{C}$) (Figura 2). Trabalhos mais recentes, expõem que a construção de leitos fluidizados com novos sistemas de classificação de partículas deverão ser implementadas nos laboratórios que trabalhem processos CaL (Jayarathna et al., 2018) no intuito de avaliar, num sistema mais realístico, o decaimento total dos sorventes de CO_2 durante um processo CaL, uma vez que este item é o principal obstáculo para a implementação desta tecnologia em grande indústria.

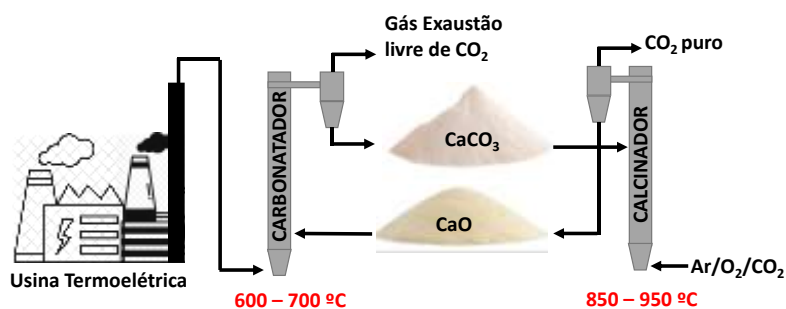


Figura 2 – Sistema de *Calcium Looping* aplicada à usinas termoeletricas.

Segundo Dieter et al (2015) uno dos passos mais importante do desenvolvimento da *calcium looping* é a demonstração do processo em escala industrial, uma vez que pode ser operado em condições mais reais do que nos processos de estala laboratório (análise termogravimétrico - TGA).

METODOLOGIA

Dimensionamento do leito fluidizado circulante (LFC)

Os leitos fluidizados a frio são amplamente utilizados para estudar processos fundamentais incluindo mistura de partículas e características de separação (LIU et al., 2020). O modelo a frio do leito fluidizado foi projetado considerando o tamanho de partícula e velocidade do gás, os quais foram determinados considerando as características físicas do calcário brasileiro e do gás a serem utilizados.

Velocidade mínima de fluidização e Velocidade terminal

Antes de começar a dimensionar o equipamento em si, é necessário definir a velocidade do fluido, porque está é um parâmetro essencial. No leito fluidizado em regime rápido e turbulento a principal consideração será aquela mostrada na equação 2, onde a

velocidade superficial do fluido (U) deverá ser maior que a velocidade terminal do sorvente (U_t) (LIU et al., 2020)

$$U \gg U_t, \quad [2]$$

A velocidade de mínima fluidização U_{mf} é uma propriedade importante do sólido. Ele influencia não só no leito fluidizado, mas também na válvula Loop-Seal. Assim esta propriedade também foi estudada neste projeto. A correlação utilizada foi aquela dada por Grace a qual pode ser utilizada tanto para partículas esféricas como não esféricas:

$$U_{mf} = \frac{\mu_g}{d_p \rho_g} [(C_1^2 + C_2 Ar)^{0,5} - C_1], \quad [3]$$

Onde $C_1 = 27,2$, $C_2 = 0,0408$ e Ar é o número de arquimides calculado na seguinte equação:

$$Ar = \frac{\rho_g (\rho_p - \rho_g) d_p^3 g}{\mu_g^2}, \quad [4]$$

Esta correlação foi baseada na correlação de Ergun a qual é uma correlação empírica (LIU et al., 2019). Para o cálculo da velocidade terminal (U_t) foi utilizada a Equação 5:

$$U_t = \left[\frac{4 d_p (\rho_p - \rho_g) g}{3 C_D \rho_g} \right]^{1/2}, \quad [5]$$

Onde o coeficiente de arrasto (C_D) pode ter diferentes valores dependendo do número de Reynolds

$$C_D = \frac{24}{Re_t}, \text{ quando } Re_t < 2;$$

$$C_D = \frac{18,5}{Re_t^{0,6}}, \text{ quando } Re_t = 2 - 500;$$

$$C_D = 0,44, Re_t = 500 - 20000.$$

Sendo que o número de Reynolds (Re) pode ser determinado pela seguinte equação [6]

$$Re = \frac{d_p \mu \rho_g}{\eta_g}, \quad [6]$$

Cálculo da Altura da coluna

Durante a fluidização, o leito irá expandir-se de forma a manter a queda de pressão constante, logo é necessário calcular o valor dessa expansão. Então o valor da coluna (H_T) é resultado da soma da altura do leito de freeboard (H_f) e a altura de leito na fase densa (H_d).

$$H_T = H_f + H_d \quad [7]$$

Para poder calcular a altura freeboard (H_f), se utilizou a metodologia de Kunii e Levenspiel (1991). Kunii e Levenspiel (1991) indicam que a fração dos sólidos está em função da altura do leito, sendo que para um regime rápido, que permita o transporte dos sólidos, deverá ser determinada a porosidade na saída do leito (ε_{se}), esta variável pode ser calculada mediante a seguinte equação

$$\varepsilon_{se} = \varepsilon_{*s} + (\varepsilon_{sd} - \varepsilon_{*s}) \times e^{-aH_f}, \quad [8]$$

Onde “ ε_{*s} ” é a porosidade inicial do leito, “ ε_{sd} ” é a porosidade na região menos densa do leito e “ a ” é constante. Logo o inventário total dos sólidos em todo o leito ($H_t = H_f + H_d$) pode ser calculado utilizando a equação 9:

$$L_m(1 - \varepsilon_m) = \left[\frac{(\varepsilon_{sd} - \varepsilon_{*s})}{a} \right] + (\varepsilon_{sd} \times H_T) - [\varepsilon_{se} \times (\varepsilon_{sd} - \varepsilon_{*s})], \quad [9]$$

Onde L_m é a altura inicial do leito, ε_m é a porosidade do leito fixo e H_T é a altura total do leito. Para obter uma equação em função do H_f , podemos substituir a equação [8] na equação [9] e logo resolver ela graficamente. Uma vez determinado a altura H_f pode ser determinado a altura H_b , para um determinado H_T .

Projeto do ciclone

O ciclone a ser utilizado é do tipo LAPPLE, este tipo de ciclone pode ser projetado tendo variáveis tais como o diâmetro de corte D . O diâmetro de corte é uma função das propriedades do sólido e do fluido, do tamanho do ciclone e das condições operacionais. O modelo LAPPLE (1951) é um dos primeiros métodos para estimar a eficiência granulométrica. Sua teoria baseou-se num balanço de forças para a partícula quase estacionária, assumindo que o tempo de residência da partícula pode ser expresso através do número de voltas do fluido dentro do ciclone (LUNA, 2021).

Para o cálculo se utilizou a relação empírica de Rosin, Rammler e Intelman e é mostrada a continuação (Equação 14) e a sua interrelação com o diâmetro da partícula (Figura 10).

$$D_c = \sqrt{\frac{9\mu_f b}{2\pi N U_c (\rho_p - \rho_f)}}, \quad [10]$$

Onde “b” é a largura do duto de entrada, N é o número de voltas que dará a partícula dentro do ciclone, “Uc” será a velocidade do fluido no duto da entrada do ciclone, “μf” é a viscosidade do fluido, “ρf” é a massa específica do fluido e “ρp” massa específica da partícula.

Logo, considerando que o ciclone LAPPLE terá um número de voltas dentro do ciclone igual a 5 e que b é igual a D/4, podemos expressar a equação 11 da seguinte forma:

$$D = 13,96 \left[\frac{U_c (\rho_p - \rho_f) D_c^2}{\mu_f} \right], \quad [11]$$

Tendo o diâmetro D determinado podemos calcular todas as outras variáveis do ciclone (Tabela 1 e Figura 3)

Tabela 1 – relação das variáveis de projeto om o diâmetro D.

Variáveis	Relação
a	D/2
S	D/1,6
h	2h
B	D/4
b	D/4
De	D/2
Z	2D

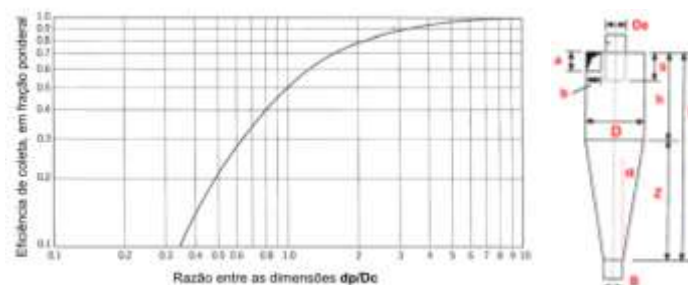


Figura 3 – Curva de eficiência do ciclone LAPPLE em função do diâmetro de corte e o projeto do Ciclone LAPPLE com as variáveis de projeto (LUNA, 2021).

Projeto da válvula Loop Seal

A maioria dos sistemas de leito fluidizado circulante nos estudos de Calcium Looping, utilizam a valvula *Loop-Seal* para realizar a recirculação dos sólidos. O sólido e o gás do

ciclone entram no *standpipe*, um gás secundário pode entrar à câmara de fornecimento de partículas através do distribuidor, isto ajudará ao sólido fluir com maior facilidade até o riser ou leito. Geralmente este movimento se faz num regime de leito empacotado formado no *standpipe* a qual alimenta os sólidos à câmara de fornecimento e direciona a câmara de reciclagem mediante o fornecimento do gás secundário. Para que o loop-seal funcione corretamente o balance das pressões do leito e as outras partes sevem ser iguais (BASU P, BUTLER J, 2009).

Para o dimensionamento utilizamos a metodologia do Basu (2006), onde indica que primeiro deve ser determinado a velocidade dos sólidos no *standpipe* (Equação 12).

$$U_s = 1,6 d_s^{0,5}, \quad [12]$$

Onde d_s é o diâmetro da saída do ciclone. A equação fornecida por Basu (2006) é dada para d_s menores que 0,2 m. a velocidade dos sólidos no *standpipe* é importante para poder determinar a taxa de circulação de sólidos (W_s) a qual pode ser determinada pela equação 13.

$$W_s = \frac{\pi}{4} (d_s^2) (1 - \varepsilon_s) (\rho_s) (U_s), \quad [13]$$

Onde ρ_s é massa específica da partícula sólida e ε_s é a porosidade do leito na câmara de fornecimento (é considerado 0,5). Agora para determinar o d_s podemos combinar a equação 12 e 13, dando a equação 14.

$$d_s = \left[\frac{4W_s}{\pi(1,6)(1-\varepsilon_s)\rho_s} \right]^{(1/2,5)}, \quad [14]$$

Com o diâmetro da saída do ciclone determinado pode ser determinado o comprimento, a largura e a altura da aberturado Loop-Seal utilizando a equação 15, 16 e 17, respectivamente:

$$L = 2,5 d_s, \quad [15]$$

$$W = 1,25 d_s, \quad [16]$$

$$h_s = \frac{W_s}{(1-\varepsilon_s)\rho_s U_h W}, \quad [17]$$

De acordo com BASU (2006) a altura da abertura do loop-seal poderá ser projetada sobre as bases da velocidade horizontal do sólido, a qual está numa faixa de 0,05 m/s até 0,25 m/s, isto deverá estar sujeito a uma altura aproximada de 10 vezes o diâmetro da partícula mais grossa, Cheng (2005) recomenda também que esta velocidade seja o dobro da velocidade de queda da partícula no standpipe. Basu (2006) indica ainda que quanto maior a velocidade horizontal do sólido, mais profundo será a altura do Loop-Seal.

A altura total do Loop-Seal poderá ser determinada pela equação 18:

$$L_s = \frac{\Delta P_{E-D}}{\left[150 \left(\frac{(1-\varepsilon_s)^2}{\varepsilon_s^3} \right) \left(\frac{\mu \Delta \mu}{(\varphi_s d_s)^2} \right) + 1,75 \left(\frac{1-\varepsilon_s}{\varepsilon_s^3} \right) \left(\frac{\rho_s (\Delta U)^2}{\varphi_s d_s} \right) \right]}, \quad [18]$$

Onde L_s é a altura do loop-seal, ρ_s é a massa específica da partícula sólida, μ é a viscosidade do gás, φ é a esfericidade da partícula, DU representa a velocidade relativa do gás-sólido e determinada na equação 19.

$$\Delta U = \frac{U_o}{\varepsilon_s} + U_s, \quad [219]$$

Onde U_o/ε_s é a velocidade do gás e U_s velocidade do sólido. Onde U_s pode ser determinada pela equação 20:

$$U_s = \frac{4m_{ssp}}{\pi M^2 \rho_s (1-\varepsilon_s)}, \quad [20]$$

Onde m_{ssp} é a taxa mássica de sólidos na zona de descarga do standpipe, M é a seção transversal da coluna da câmara de fornecimento do loop-seal.

Para determinar a queda de pressão na abertura entre as duas câmaras, pode ser utilizada a equação 21:

$$\Delta P_{E-F} = 0,66 \left[\frac{Q_H}{U_H A_{sc}} \right]^{-1,2} G_{sf} \quad [21]$$

Na câmara de reciclagem, os sólidos são fluidizados pelo ar que entra pelo fundo desta seção. Uma câmara adequadamente projetada deve permitir que o nível do leito ultrapasse a

altura da barragem conforme ilustrado na Figura 16, liberando o fluxo de sólidos para o tubo de reciclagem e o leito (riser). De acordo com Basu e Cheng (2000) a altura da barragem pode ser calculada pela queda de pressões apresentada na equação 22:

$$\Delta P_{F-G} = (1 - \varepsilon_r)(h_r + \Delta h_r)g\rho_s, \quad [22]$$

Onde h_r é a altura da barragem da câmara de reciclagem, onde pode ser estimada como duas vezes a altura da abertura entre as câmaras e Δh_r é igual a 0,15 vezes a altura da barragem da câmara de reciclagem, ε_r é a porosidade na câmara de reciclagem e é determinada pela equação 23:

$$\varepsilon_r = \frac{U_r + 1}{U_r + 2}, \quad [23]$$

Sendo que U_r é a velocidade do gás na câmara de reciclagem e pode ser calculada pela expressão dado pelo Muschelknautz e Greif apresentada na equação 24 (BASU, 2006):

$$U_r = (0,33 \text{ a } 0,2) U^*_t, \quad [24]$$

Onde U^*_t é a velocidade terminal da partícula do diâmetro de corte do ciclone d_{50} e é calculada pela seguinte equação [25]:

$$U^*_t = \frac{\rho_s g d_{50}^2}{18\mu_g}, \quad [25]$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Projeto do leito fluidizado circulante (LFC)

O projeto do LFC foi feito utilizando um calcário brasileiro e como gás se assumiu que será Ar, as propriedades são listadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Propriedades da partícula sólida e o fluido ou gás.

<i>Calcário</i>	
Massa (kg)	0,100

dp (m)	0,000363
pp (kg/m ³)	2200
<i>Ar Sintético</i>	
ρg (kg/m ³)	1,1839
μg (Kg/m*s)	1,85E-05
g (m/s ²)	9,8

Altura do leito

A altura do leito projetado neste trabalho foi de 1,5 m e um diametro interno de 0,05 m, para o calculo se assumiu um prato distribuidos de ar com 37 orificios de tamanho de 2 mm cada orificio. Os valores determinados para o leito são mostrados na Tabela 3. Para o tamanho de particulas utilizadas, a velocidade de minima fluidização será de 0,01 m/s e a utilizada no leito foi de 2,9 m/s para conseguir o transporte das partículas. Do projeto se observou que a altura da fase densa (H_d) será de 60 cm e a altura de freeboard (H_f) será de 90 cm. A porosidade inicial do leito foi considerado de 0,5 com os calculos se observou que na fase densa a porosidade será de 0,22 e na fase freeboard (restante do leito) terá uma porosidade constante de 0,01.

Tabela 3 – Variáveis de projeto do leito ou riser do LFC.

<i>Variáveis de projeto</i>	<i>Valores</i>
U_{mf} (m/s)	0,01
U_t (m/s)	1,3
U (m/s)	2,9
L_m (m)	0,023
ϵ_m	0,50
ϵ_{sd}	0,22
ϵ_{se}	0,01
H_f (m)	0,9
H_d (m)	0,6
H_T (m)	1,5

Ciclone LAPPLE

O projeto do ciclone foi considerando um diametro (D) do ciclone em 10 cm, com o valor fixado foram determinadas as outras variáveis do projeto, e calculado a velocidade do gás do ciclone, o diametro de corte e a eficiencia (Tabela 4).

Tabela 4 – Variáveis de projeto do ciclone tipo LAPPLE do LFC.

<i>Variáveis de projeto</i>	<i>Valores</i>
-----------------------------	----------------

D (m)	0,10
a (m)	0,05
S (m)	0,06
H (m)	0,20
B (m)	0,025
De (m)	0,05
Z (m)	0,20
B (m)	0,025
U _c (m/s)	2,9
Dc E-06 (m)	6,81
Eficiência (%)	100

Podemos observar que o diâmetro de corte do ciclone projetado foi de 68 μm , sendo que a eficiência de reciclagem de partículas de tamanho de 363 μm será de 100%. A velocidade do gás entrante ao ciclone será de 2,9 m/s.

Loop-Seal

Uma vez calculado a saída do ciclone, foi projetada a válvula *loop-seal*, para isto se considero o diâmetro do standpipe como sendo o tamanho da saída do ciclone (0,025). O tamanho do loop-seal (Tabela 5) será de 6 cm de comprimento dividido em duas câmaras de 3 cm cada câmara (câmara de fornecimento e câmara de reciclagem), a largura foi de 2,8 cm e a abertura entre as câmaras será de 1,3 cm, essa abertura servirá para a passagem das partículas da câmara de fornecimento para a câmara de reciclagem. A altura da câmara de fornecimento é de 9 cm e a altura da barragem na câmara de reciclagem será de 2,6 cm.

Tabela 5 – Variáveis de projeto do *loop-seal* do LFC.

<i>Variáveis do projeto do loop-seal</i>	<i>valor</i>
ds (m)	0,025
L _{Seal}	0,06
W _{Seal}	0,028
h _s (m)	1,318
h _{CA} (m)	0,088
h _w (m)	0,026

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A metodologia utilizada para o projeto do leito fluidizado circulante foi adequado uma vez que conseguiu recircular a massa de 100 gramas de partículas com 363 μm . o ciclone não

conseguiu ter uma eficiência de 100%, uma vez que partículas menores a 363 μm foram expelidas pela abertura superior do ciclone, entretanto a eficiência permaneceu elevada sendo 95%. Este leito fluidizado circulante pequeno poderá ser utilizado em futuros estudos sobre a fluidodinâmica dos calcários e como base para projetar o LFC a quente, uma vez que o LFC a frio teve uma boa recirculação das partículas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo (PRH-ANP Nº 34.1), à FINEP e Ministério de Ciência e tecnologia.

REFERÊNCIAS

- ERANS M., et al. Calcium looping sorbent for CO₂ capture. *Applied Energy*. v. 180, p. 722 – 742, 2016.
- WANG et al. Effect of preparation methods on the structure and property of Al-Stabilized CaO-based sorbents for CO₂ capture. *Fuel Processing Technology*. v. 173, p. 276 – 284, 2018.
- ZHANG et al. Preparation of CaO-Al₂O₃ sorbent and CO₂ capture performance at high temperature. *Fuel*. v. 111, p. 636 – 642, 2013.
- HIRAMA, T.H.; KITANO K.K.; SHIMIZU, T. Method of separating carbon dioxide from carbon dioxide containing gas and combustion apparatus having function to separate carbon dioxide from the combustion gas, UK Pat., 2291051A, 1996.
- ABANADES, J. C. et al. Emerging CO₂ capture systems. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, v. 40, p. 126–166, 2015.
- BENITEZ-GUERRERO et al. Calcium Looping performance of mechanically modification Al₂O₃-CaO composites for energy storage and CO₂ capture. *Chemical Engineering Journal*. v. 334, p. 2343-2355, 2018
- JAYARATHNA C., BALFE ., MOLDESTAD B. M. E., TOKHEIM L-A. Improved multi-stage cross-flow fluidized bed classifier. *Powder Technology*. v. 342, p. 621 – 629, 2019.
- FENNELL P. e BEN A. Calcium and Chemical Looping Technology for Power Generation and Carbon Dioxide (CO₂) capture. Woodhead publishing - Elsevier. Amsterdam. 2015.
- DIETER H, BIDWE R, SCHEFFKNECHT. Pilot Plant Experience with Calcium Looping. Calcium and Chemical Looping Technology for power generation and carbon dioxide (CO₂) capture: Capítulo 9. Woodhead publishing – Elsevier. Amsterdam. 2015.
- LIU Y., SUN Z., TOAN S., SHIYI C., WENGUO X. Investigation on fluid dynamics of binary particles in a dual fluidized bed reactor system for enhanced calcium looping gasification process. *Powder technology* 361, pp. 803 – 811. 2020.
- LIU Y., CHEN S., ZHU M., SOOMRO A., XIANG W. Investigation of a dual cold-flow fluidized for calcium looping gasification process. *Powder Technology* 353, pp. 10-19. 2019.
- KUNII D., LEVESPIEL O., Fluidization Engineering. Editora Butterworth-Heinemann segunda edição. Boston. 1991.
- LUNA, C.M.R.L. Projeto de ciclone LAPPLE. Apostila de operações unitárias. Curso de engenharia de produção. 2021.
- BASU P, BUTLER, J. Studies on the operation of loop-seaç in circulating fluidized bed boilers. *Applied Energy* 86, pp 1723-1731. 2009.
- BASU P. Combustion and Gasification Fluidized Beds. Taylor and Francis group. 2006.
- BASU P., CHENG L. An analysis of Loop Seal Operation in a circulating fluidized bed. *Transaction in Chemical Engineering* 78, pp 991-998 Part A. 2000.