



Exploração das Iniciativas de Aproveitamento de CO₂

Marina Teixeira Chagas

Monografia em Engenharia Química

Orientadora

Prof. Flávia Chaves Alves, D.Sc.

Fevereiro de 2020

EXPLORAÇÃO DAS INICIATIVAS DE APROVEITAMENTO DE CO₂

Marina Teixeira Chagas

Monografia em Engenharia Química submetida ao Corpo Docente da Escola de Química,
como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenharia Química.

Aprovado por:

Flávia Chaves Alves, D.Sc.

Fábio de Almeida Oroski, D.Sc.

Juliana Pereira Targueta, M.Sc.

Orientado por:

Flávia Chaves Alves, D.Sc.

Rio de Janeiro, RJ – Brasil

Fevereiro de 2020

Chagas, Marina Teixeira.

Exploração das iniciativas de aproveitamento de CO₂ / Marina Teixeira Chagas. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2020

xi, 82 p.

(Monografia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2020.

Orientadora: Flávia Chaves Alves.

1. CO₂ 2. Iniciativas. 3.Utilização de carbono. 4. Monografia. (Graduação – UFRJ/EQ). 5. Flávia Chaves Alves.

Para meus pais, Arilda e Eugênio

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Arilda e Eugênio, minha inspiração e maiores apoiadores, por se fazerem presentes mesmo quando fisicamente distantes; por me ensinarem desde pequena o valor do conhecimento; por sempre acreditarem no meu potencial e comemorarem comigo cada uma de minhas vitórias.

À Sonia, por toda a atenção, carinho e companhia quando meus pais não estavam por perto.

Ao meu namorado, Raphael, pela cumplicidade ao longo da faculdade; pelo apoio em tantos momentos, bons e ruins, e por sempre acreditar em mim.

À minha orientadora, Flávia, por todas as trocas ao longo do último ano; pela paciência e disposição em me orientar.

A todos os professores que marcaram minha trajetória acadêmica e me mostraram como é prazeroso aprender.

À minha família, que mesmo distante acompanhou e vibrou pelas minhas conquistas.

Aos meus amigos, que tornaram esta caminhada mais leve.

Resumo da Monografia apresentada à Escola de Química como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Engenharia Química.

EXPLORAÇÃO DAS INICIATIVAS DE APROVEITAMENTO DE CO₂

Marina Teixeira Chagas

Fevereiro, 2020

Orientadora: Prof. Flávia Chaves Alves, D.Sc.

Por muito tempo, o dióxido de carbono produzido a partir de atividades humanas, também denominadas antropogênicas, foi considerado um resíduo e descartado diretamente na atmosfera. Recentemente, com o fortalecimento dos discursos acerca da busca por maior eficiência no aproveitamento de recursos, a utilização do CO₂ para a obtenção de novos produtos surge como uma possibilidade interessante, chamando a atenção da comunidade científica, indústria e governos. Assim, torna-se relevante compreender a dinâmica atual de aproveitamento de dióxido de carbono como matéria prima. Este trabalho teve com objetivo mapear iniciativas de aproveitamento de CO₂ e caracterizá-las quanto a cinco dimensões de análise: características gerais, modelo de negócio, matéria prima, tecnologia e produto. Para tal, foi construída uma base de dados a partir das iniciativas veiculadas em mídia especializada entre setembro de 2010 e dezembro de 2019. Os resultados obtidos mostraram que cerca de metade dos projetos identificados no período de interesse e suas organizações líderes é oriunda dos Estados Unidos. Observou-se uma presença expressiva de empresas dos setores de biocombustíveis e químicos verdes, tecnologia, gases industriais e materiais avançados na liderança dos projetos, bem como um predomínio de empresas estabelecidas, ainda que muitas fundadas a partir do ano 2000. Verificou-se a existência de parceria em 65,1% dos projetos, sendo mais frequentes os acordos para fornecimento de matéria prima e o desenvolvimento conjunto de tecnologia. A principal fonte de CO₂ utilizada nos projetos foi o gás carbônico gerado em processos de fermentação, sobretudo na produção de biocombustíveis. Em termos de tecnologia, a rota biotecnológica se destacou frente às rotas químicas tradicionais, e os processos de aproveitamento de CO₂ se mostraram pautados no uso de fontes renováveis de energia. Observou-se que 57,5% das iniciativas se encontram em escala de bancada ou piloto, evidenciando o baixo grau de maturidade de grande parte das tecnologias. No que diz respeito aos produtos obtidos e suas aplicações, verificou-se a predominância de produtos classificados como *drop-in* e *commodities*, sendo notável o uso do próprio CO₂ purificado e/ou liquefeito como produto. No geral, foi possível perceber uma convergência para o mercado de combustíveis, com a utilização do dióxido de carbono para a produção direta de combustíveis ou de intermediários utilizados para a sua obtenção. Além disso, observou-se uma presença expressiva do setor de gases industriais em um fenômeno de diversificação da fonte de obtenção de CO₂ porém com a manutenção de sua atividade original.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. A Molécula CO ₂	3
2.2. Usos Estabelecidos de CO ₂	5
2.3. Emissões de CO ₂	6
2.4. Captura de CO ₂	11
2.4.1. Pós Combustão	12
2.4.2. Pré-Combustão.....	16
2.4.3. Processo <i>Oxy-Fuel</i>	20
2.4.4. Processo <i>Chemical Looping Combustion</i>	22
2.4.5. Separação Inerente	25
2.4.6. Captura Direta do Ar.....	26
2.5. Armazenamento de CO ₂	28
2.6. Utilização de CO ₂	34
2.7. Diferenças entre Armazenamento e Utilização de Carbono.....	36
3. METODOLOGIA	39
3.1. Definição da Fonte de Informação	40
3.2. Definição do Termo de Busca	40
3.3. Definição do Período de Interesse	41
3.4. Definição das Variáveis de Interesse.....	41
3.5. Busca Inicial	43
3.6. Verificação dos Resultados	43
3.7. Busca das Informações sobre as Variáveis de Análise.....	44
3.8. Construção da Base de Dados	45
3.9. Procedimento para a Análise dos Resultados	45
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
4.1. Publicação de Notícias Relacionadas ao CO ₂	46
4.2. Características Gerais	47
4.3. Modelo de Negócio	50
4.3.1. Organização Líder.....	50
4.3.2. Parceria	55
4.3.3. Financiamento.....	58
4.4. Matéria-prima	58

4.5.	Tecnologia	60
4.5.1.	Aspectos Tecnológicos	61
4.5.2.	Energia	62
4.5.3.	Configuração.....	63
4.5.4.	Escala	64
4.6.	Produto	66
4.7.	Análises Cruzadas	71
4.7.1.	Relação entre os setores das organizações líderes e as rotas de conversão	71
4.7.2.	Relação entre os setores das organizações líderes e os produtos obtidos.....	73
4.7.3.	Relação entre os produtos obtidos e as rotas de conversão	74
4.7.4.	Relação entre os produtos obtidos e o grau de maturidade.....	75
5.	CONCLUSÃO	76
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama de Fases do CO ₂	4
Figura 2: Emissões globais de CO ₂ por setor em 2017	8
Figura 3: Distribuição global de grandes fontes estacionárias de CO ₂	9
Figura 4: Emissões territoriais de CO ₂ em 2018	10
Figura 5: Emissões globais de CO ₂ por queima de combustíveis	11
Figura 6: Representação do processo de pós combustão.....	14
Figura 7: Diagrama simplificado de processo de captura de CO ₂ a partir de gás de combustão por absorção química.....	15
Figura 8: Representação do processo de pré-combustão.....	18
Figura 9: Diagrama simplificado do processo de pré-combustão	19
Figura 10: Representação do processo <i>oxy-fuel</i>	21
Figura 11: Diagrama de processo de uma planta <i>oxy-fuel</i> com carvão pulverizado como combustível.....	21
Figura 12: Representação do processo de combustão <i>chemical looping</i>	24
Figura 13: Diagrama de processo de combustão <i>chemical looping</i> utilizando óxido de níquel como transportado de oxigênio.....	24
Figura 14: Representação do processo de separação inerente.....	25
Figura 15: Tecnologia de captura de CO ₂ do ar desenvolvido pela <i>startup Climeworks</i>	27
Figura 16: Tecnologia de captura de CO ₂ do ar desenvolvido pela <i>startup Carbon Engineering</i>	28
Figura 17: Representação simplificada do processo de CO ₂ -EOR.....	31
Figura 18: Representação do projeto <i>In Salah Gas Project</i> , na região central da Argélia.....	31
Figura 19: Representação simplificada do projeto <i>Sleipner</i>	32
Figura 20: Produtos químicos obtidos a partir do CO ₂	35
Figura 21: Caminhos para armazenamento e utilização de carbono	38
Figura 22: Etapas da metodologia	40
Figura 23: Dimensões de análise e suas respectivas variáveis de interesse	42
Figura 24: Distribuição temporal das publicações relacionadas ao termo “dióxido de carbono” no período de setembro de 2010 a dezembro de 2019 no portal <i>Biofuels Digest</i>	46
Figura 25: Distribuição geográfica por país das iniciativas mapeadas para a utilização de CO ₂	49

Figura 26: Distribuição geográfica por continente das iniciativas mapeadas para a utilização de CO ₂	49
Figura 27: Distribuição por continente das organizações identificadas como líderes dos projetos	51
Figura 28: Setor de atuação das empresas identificadas como líderes dos projetos.....	53
Figura 29: Relações de parceria identificadas entre as organizações envolvidas nos projetos de utilização de CO ₂	55
Figura 30: Número de organizações envolvidas nos projetos de aproveitamento de CO ₂	57
Figura 31: Fontes de CO ₂ visados como matéria-prima para os projetos	59
Figura 32: Rotas tecnológicas identificadas nos projetos para a conversão de CO ₂	62
Figura 33: Grau de maturidade dos projetos de utilização de CO ₂	65
Figura 34: Produto alvo dos projetos de aproveitamento de CO ₂	67

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Aplicações Industriais de CO ₂	6
Tabela 2: Perfil por atividade industrial ou de processo de grandes fontes estacionárias de CO ₂ do mundo, com emissões superiores a 0,1 Mt de CO ₂ por ano	8
Tabela 3: Pureza do CO ₂ em diferentes fontes	10
Tabela 4: Resultados das etapas de busca inicial e verificação de resultados para a busca por “CO ₂ ” de setembro/2010 a dezembro/2019 no site <i>Biofuels Digest</i>	44
Tabela 5: Status atual dos projetos de utilização de carbono	50
Tabela 6: Composição da amostra de organizações líderes	52
Tabela 7: Classificação das empresas identificadas como líderes dos projetos	54
Tabela 8: Aplicações dos produtos obtidos a partir de CO ₂	68
Tabela 9: Classificação dos produtos de acordo com a sua natureza	70
Tabela 10: Setores das organizações líderes e as rotas de conversão adotadas em seus projetos	71
Tabela 11: Setores das organizações líderes e os produtos obtidos em seus projetos.....	73
Tabela 12: Produtos de interesse e rotas de conversão adotadas para a sua obtenção	74
Tabela 13: Produtos de interesse e grau de maturidade de seus respectivos projetos.....	75

1. INTRODUÇÃO

Por muito tempo, o dióxido de carbono produzido a partir de atividades humanas, também denominadas antropogênicas, foi considerado um resíduo e descartado diretamente na atmosfera. Conhecido como principal gás do efeito estufa, processo natural através do qual a superfície do planeta Terra e a baixa atmosfera são mantidas aquecidas, o CO₂ teve suas emissões intensificadas com o início da era industrial na metade do século XVIII em função da queima de combustíveis fósseis e de atividades industriais nas quais é gerado como subproduto. Devido às mudanças climáticas associadas a esse aumento nas concentrações atmosféricas dos gases de efeito estufa, ao gás carbônico costuma-se atribuir uma conotação negativa.

Por esse motivo, o assunto CO₂ é frequentemente inserido em discussões acerca de medidas de mitigação da questão climática, as quais visam unicamente à redução de sua emissão. É o caso, por exemplo, de iniciativas de armazenamento de CO₂, em que o gás carbônico emitido é capturado e destinado para armazenagem em formações geológicas adequadas, reduzindo, assim, a quantidade liberada para a atmosfera.

No entanto, o dióxido de carbono emitido pode também ser visto como um recurso valioso, uma vez que contém carbono, um dos elementos químicos mais usados e processados do planeta Terra (BILLIG *et al*, 2019). Assim, ele pode ser utilizado como matéria-prima na obtenção de uma série de compostos, tendo potencial, inclusive, para reduzir a dependência de recursos de origem fóssil (IEA, 2011).

Impulsionado pelo fortalecimento dos discursos acerca da busca por maior eficiência no aproveitamento de recursos como um todo, surge o conceito de captura e utilização de carbono (CCU, do inglês *Carbon Capture and Utilization*). A sua proposta, a qual vem chamando a atenção da comunidade científica, indústria e governos, é aproveitar o CO₂, presente no ar ou

gerado em outros processos como resíduo, como fonte alternativa de carbono para a obtenção de produtos de valor comercial (LEONZIO, FOSCOLO E ZONDERVAN, 2019).

As possibilidades de utilização do dióxido de carbono são amplas, incluindo tanto o seu uso direto, quando o CO₂ não é quimicamente alterado, quando a sua conversão em outros compostos. Até o momento, as aplicações comerciais diretas de CO₂ são mais recorrentes, porém as rotas de conversão vêm se tornando mais atrativas haja vista a oportunidade de obtenção de uma vasta gama de produtos, como combustíveis, materiais e compostos químicos diversos.

Nesse contexto, torna-se relevante compreender a dinâmica atual de aproveitamento do dióxido de carbono como matéria-prima. Diante disso, surgem algumas perguntas: quem são os atores e como estão estruturadas suas iniciativas em torno do aproveitamento de CO₂? Em que grau de maturidade se encontram os projetos? Quais fontes de carbono estão sendo contempladas nessas iniciativas? Quais rotas tecnológicas estão sendo utilizadas e quais os produtos se pretende obter?

A fim de responder a esses questionamentos, este trabalho apresenta como objetivo mapear iniciativas de aproveitamento de CO₂ e caracterizá-las quanto a cinco dimensões de análise: características gerais, modelo de negócio, matéria-prima, tecnologia e produto. Para tal, os projetos atuais relacionados à utilização de dióxido de carbono foram identificados através de mídia especializada e analisados em termos qualitativos e quantitativos a partir de uma série de variáveis de interesse.

Este trabalho está estruturado em quatro capítulos além dessa introdução. O capítulo 2 consiste em uma revisão bibliográfica realizada para a construção de uma base conceitual sobre o tema e encontra-se subdividido em sete seções. No capítulo 3 encontra-se descrita a metodologia adotada para a identificação dos projetos e construção da base de dados, como a

fonte de informação, o período e as variáveis de interesse. No capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados obtidos, ao passo que o capítulo 5 traz as conclusões do trabalho, suas limitações e sugestões de trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são caracterizadas a molécula, as diferentes possibilidades de uso e as emissões de dióxido de carbono. Além disso, são discutidos os processos de captura, armazenamento e utilização de carbono, bem como as diferenças entre essas duas aplicações para o CO₂.

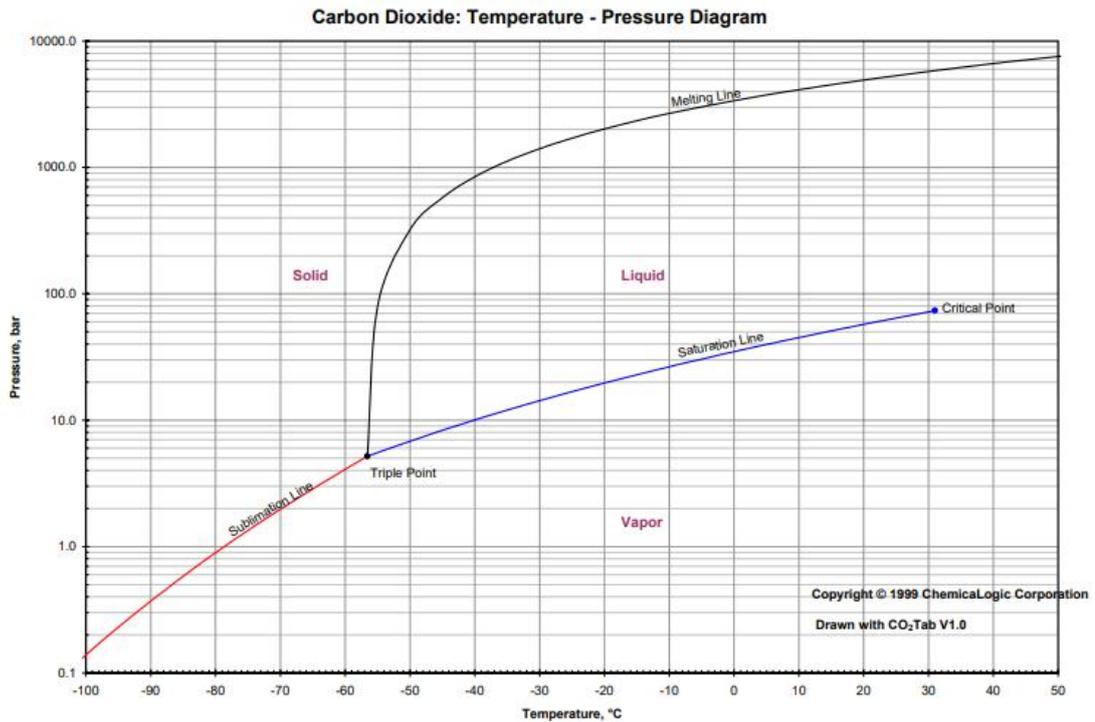
O capítulo está estruturado em sete seções, uma para cada tópico citado anteriormente. A quarta seção, referente à captura de dióxido de carbono, encontra-se dividida em seis subseções, nas quais são detalhadas diferentes possibilidades tecnológicas para o processo.

2.1. A Molécula CO₂

O dióxido de carbono é um composto químico de dois elementos, carbono e oxigênio, na proporção de 1:2, cuja fórmula molecular é CO₂ (IPCC, 2005). A molécula de CO₂ apresenta geometria linear e caráter apolar.

Na Figura 1 encontra-se o diagrama de fases do CO₂, onde é possível observar a variação de seu estado físico de acordo com a temperatura e a pressão.

Figura 1: Diagrama de Fases do CO₂



Fonte: ChemicaLogic Corporation, 1999

A temperatura e pressão ambientes (25°C e 1,013 bar), o dióxido de carbono é um gás, com odor ligeiramente irritável, incolor e mais denso que o ar. Em temperaturas baixas, até -56,5°C, o CO₂ é um sólido e, ao ser aquecido, se a pressão for menor que 5,1 bar, o sólido sublima, passando diretamente para o estado gasoso. Para a faixa de temperatura entre -56,5°C e 31,1°C, ele pode ser transformado de vapor a líquido pela compressão até a pressão de liquefação correspondente, acompanhado de remoção do calor produzido. A temperaturas superiores a 31,1°C, para o caso de pressão superior à 73,9 bar – pressão correspondente ao ponto crítico –, diz-se que o dióxido de carbono está em um estado supercrítico, em que ele assume viscosidade de gás e densidade de líquido (KOHLI; MITTAL, 2019; IPCC, 2005).

Quando submetido a elevadas pressões, a densidade do gás se aproxima à densidade da água no estado líquido, podendo inclusive excedê-la. Esse é um aspecto importante do comportamento do CO₂ e é particularmente relevante no caso de sua estocagem (IPCC, 2005).

Em mudanças de fase sólido-gás, sólido-líquido ou líquido-gás, observa-se liberação ou absorção de calor, dependendo do sentido da mudança. Entretanto, no caso de transições entre a condição supercrítica e os estados gás ou líquido, não há a necessidade de fornecimento de calor ou a liberação do mesmo. Essa propriedade é interessante para o design de instalações de compressão de dióxido de carbono, uma vez que, se explorada, evita a necessidade de se lidar com o calor associado normalmente a mudanças de fase (IPCC, 2005).

A molécula de CO₂ é uma forma altamente estável do carbono, com uma entalpia de formação de -94,052 kcal/mol – equivalente a -394,513 kJ/mol – a 25°C (PERRY; GREEN, 1997). Por esse motivo, é necessária uma grande quantidade de energia para converter o CO₂ em outros produtos (AMPELLI; PERATHONER; CENTI, 2015), sendo este um desafio para a sua utilização. A utilização de dióxido de carbono como reagente, em muitos casos, implica, portanto, no desenvolvimento de um catalisador adequado a fim de reduzir a energia de ativação da reação desejada (NORTH; STYRING, 2015).

2.2. Usos Estabelecidos de CO₂

Uma parte já estabelecida do mercado de gases industriais envolve o suprimento de CO₂ para uma gama de clientes. Em vários processos industriais, no entanto, o dióxido de carbono é produzido *on site* como um intermediário na obtenção de químicos (IPCC, 2005).

No que tange à indústria química, o principal uso industrial de CO₂ é na produção de ureia, a qual pode ser utilizada, por exemplo, como fertilizante. Grandes quantidades de dióxido de carbono também são utilizadas na fabricação de carbonatos inorgânicos e, em menor quantidade, na produção de monômeros orgânicos e policarbonatos. Além disso, ele é utilizado para a obtenção de metanol e poliuretanos, além de ser empregado no controle de temperatura de reatores e na neutralização de efluentes alcalinos (NORTH; STYRING, 2015; IPCC, 2005).

Na indústria farmacêutica, por sua vez, o CO₂ é empregado na provisão de atmosfera inerte, em sínteses químicas, em extrações por fluido supercrítico, na acidificação de água residual e no transporte de produtos a baixas temperaturas (IPCC, 2005).

Já na indústria de alimentos, o dióxido de carbono é usado em três áreas principais: na carbonatação de bebidas; no processo de embalagem e como fluido criogênico em operações de resfriamento ou congelamento; e como gelo seco no controle de temperatura durante a distribuição dos bens alimentícios (IPCC, 2005).

Na Tabela 1 encontram-se os dados referentes ao ano de 2005 no que diz respeito à produção global e à quantidade de CO₂ consumida para as principais aplicações do dióxido de carbono citadas anteriormente.

Tabela 1: Aplicações Industriais de CO₂

Classe ou Aplicação do Produto Químico	Mercado Anual (Mt/ano)	Quantidade de CO₂ consumida por Mt de produto (Mt CO₂)
Ureia	90	65
Metanol	24	< 8
Carbonatos Inorgânicos	8	3
Carbonatos Orgânicos	2,6	0,2
Poliuretanos	10	< 10
Indústria de Alimentos	8	8

Fonte: Adaptado de IPCC, 2005

2.3. Emissões de CO₂

As emissões de dióxido de carbono decorrentes da atividade humana, também denominadas emissões antropogênicas, surgem de uma variedade de fontes, as quais podem ser diferenciadas pelo volume de emissões e pelo caráter estacionário ou móvel.

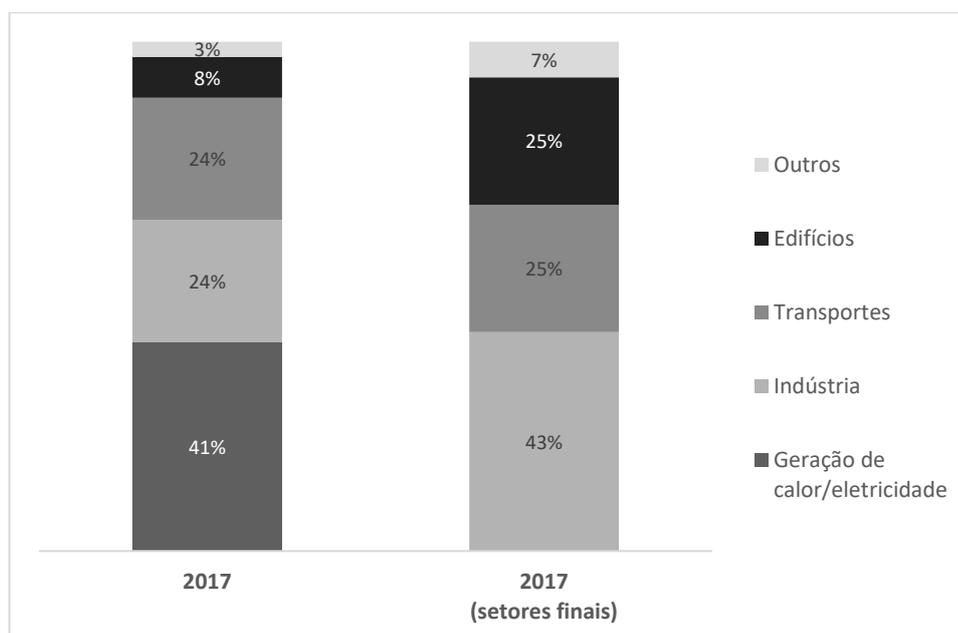
São classificadas como grandes fontes estacionárias as emissões oriundas da geração de energia e de processos industriais, como a produção de cimento, a produção de hidrogênio, a queima de combustíveis fósseis e a combustão de biomassa. Nos setores residencial e comercial, por sua vez, são observadas fontes estacionárias pequenas, como é o caso das caldeiras de aquecimento. Já o setor de transportes contribui com fontes móveis (IPCC, 2005).

A geração de calor/energia e o setor de transportes correspondem a dois terços do total de emissões de CO₂, e foram igualmente responsáveis por quase todo o crescimento global em emissões desde 2010. O terço restante se deve à indústria e aos edifícios, tanto residenciais quanto comerciais e de serviços públicos. O perfil de emissões, no entanto, varia entre os países: em vários países americanos, o transporte é predominante, ao passo que, na Ásia, metade das emissões deriva da geração de energia e menos de um sexto correspondem ao setor de transporte (IEA, 2019).

Na Figura 2, encontra-se a distribuição das emissões globais de CO₂ por setor em 2017. Na primeira coluna, as emissões decorrentes da geração de energia estão explicitadas na categoria “Geração de calor/eletricidade”, ao passo que na segunda coluna elas já estão alocadas nos setores finais correspondentes. Isto é, as emissões referentes à geração de energia em processos industriais estão contabilizadas em “Indústria” e assim por diante.

Percebe-se que, no segundo caso, a indústria correspondeu, em 2017, a pouco menos da metade do total de emissões, ao passo que os edifícios e o setor de transporte corresponderam a 25% cada um.

Figura 2: Emissões globais de CO₂ por setor em 2017



Fonte: IEA, 2019

São as grandes fontes estacionárias que apresentam maior potencial para aproveitamento por parte das tecnologias de captura de carbono. Até o ano de 2005, mais de 7500 grandes fontes de emissão já haviam sido identificadas (Tabela 2), as quais estavam distribuídas geograficamente ao redor do globo (Figura 3), mas podem ser agrupadas em quatro *clusters*: América do Norte (centro-oeste e costa leste dos Estados Unidos), Noroeste Europeu, Sudeste Asiático (costa leste) e Sul da Ásia (subcontinente indiano) (IPCC, 2005).

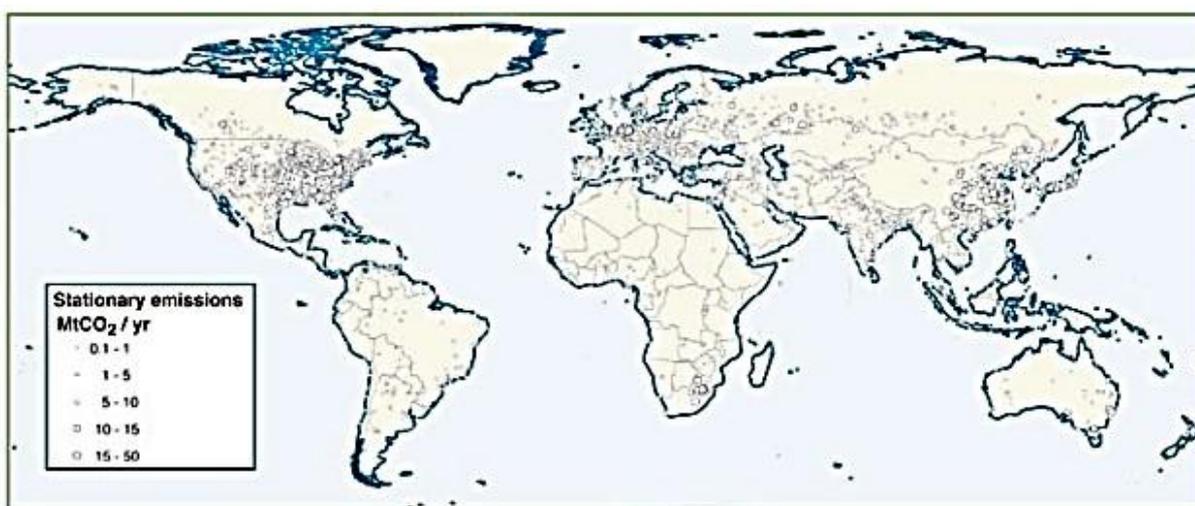
Tabela 2: Perfil por atividade industrial ou de processo de grandes fontes estacionárias de CO₂ do mundo, com emissões superiores a 0,1 Mt de CO₂ por ano

Processo	Número de Fontes	Emissões (Mt CO₂/ano)
Combustíveis Fósseis		
Energia	4.942	10.539
Produção de Cimento	1.175	932
Refinarias	638	798
Indústria do Ferro e do Aço	269	646
Indústria Petroquímica	470	379
Processamento de Óleo e Gás	N/A	50

Outras Fontes	90	33
Biomassa		
Bioetanol e bioenergia	303	91
Total	7.887	13.468

Fonte: Adaptado de IPCC, 2005

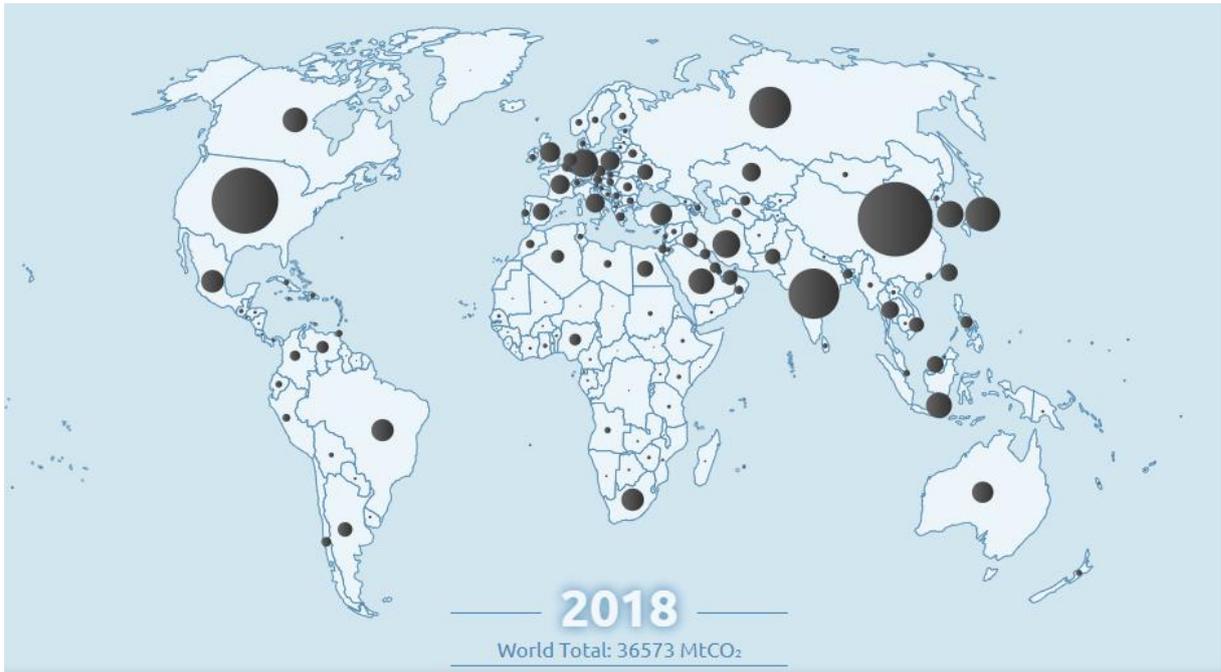
Figura 3: Distribuição global de grandes fontes estacionárias de CO₂



Fonte: IPCC, 2005

Tomando-se dados mais recentes, pode-se perceber que os *clusters* permanecem; os principais emissores de gás carbônico permanecem os mesmos. É o caso da Figura 4, que apresenta a distribuição geográfica das emissões territoriais de CO₂, ou seja, emissões atribuídas ao país onde elas ocorrem fisicamente, para o ano de 2018. Nesse caso, foram consideradas as emissões provenientes do uso de combustíveis fósseis (óleo, gás e carvão), e da produção de cimento.

Figura 4: Emissões territoriais de CO₂ em 2018



Fonte: GLOBAL CARBON ATLAS, 2019

Vale ressaltar que a maioria das fontes de emissão apresenta concentrações de CO₂ geralmente inferiores a 15% (Tabela 3), porém uma pequena parcela, apresenta concentrações superiores a 95%, o que as torna mais adequadas para a captura de carbono. Nos demais casos, faz-se necessário um processo de separação do dióxido de carbono dos outros gases antes que ele possa ser utilizado.

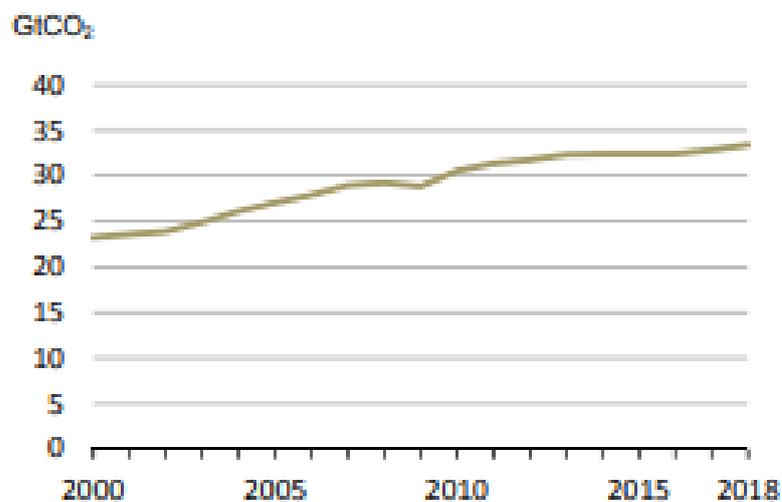
Tabela 3: Pureza do CO₂ em diferentes fontes

Fonte	Pureza do CO₂ (% volume)
Carvão	12-15
Gás Natural	3-5
Refinarias	3-13
Produção de Cimento	14-33
Produção de Etileno	12
Produção de Ferro e Aço	15
Produção de Gás Natural	5-70
Produção de Amônia	100

Fonte: Adaptado de WILCOX, 2012

Segundo a Agência Internacional de Energia (IEA, 2019), as emissões globais de dióxido de carbono em função da queima de combustíveis começaram a crescer novamente em 2017 após três anos de estabilidade, atingindo 32.8 bilhões de toneladas (Figura 5). Entre 2014 e 2016, devido a avanços em termos de eficiência energética e no que diz respeito à implantação de tecnologias de baixo carbono, as emissões de gás carbônico permaneceram estagnadas. Entretanto, a partir de 2017, esses avanços não foram mais capazes de compensar a demanda crescente por energia, resultado da robusta economia mundial bem como de condições climáticas em algumas partes do mundo as quais levaram a um aumento da demanda por aquecimento e resfriamento (IEA, 2019).

Figura 5: Emissões globais de CO₂ por queima de combustíveis



Fonte: IEA, 2019

2.4. Captura de CO₂

O objetivo da captura de dióxido de carbono é a obtenção de uma corrente de CO₂ concentrada (IPCC, 2005), seja ela para ser transportada até o local de estocagem ou para ser

utilizada como matéria-prima na obtenção de outros produtos. Para a sua captura, podem ser utilizadas diferentes tecnologias, de acordo com a pressão parcial do gás carbônico, as condições de operação e composição da corrente de origem (KOYTSOUMPA; BERGINS; KAKARAS, 2018).

Conforme mencionado anteriormente, a captura de CO₂ é mais aplicada a fontes emissoras grandes e estacionárias, como é o caso de plantas para geração de energia e plantas industriais. Vale ressaltar que a energia requerida para operar um sistema de captura de gás carbônico acarreta a redução da eficiência global da planta, pois se faz necessário uma maior quantidade de combustível, além de maior geração de resíduos sólidos e impactos ambientais, se comparado a uma planta que não realize captura de CO₂. No entanto, a tendência é que, conforme plantas com sistema de captura mais eficiente fiquem disponíveis e substituam as plantas antigas, a eficiência aumente e os impactos sejam minimizados (IPCC, 2005).

São três os principais processos para a captura de CO₂: pós combustão, pré-combustão e *oxy-fuel*. Além dessas, existem também outras tecnologias, como o processo *chemical looping combustion* e a captura de CO₂ diretamente do ar. Também pode ser observada, em alguns processos industriais, a chamada separação inerente de CO₂, em que correntes de dióxido de carbono de alta pureza são geradas em uma etapa intrínseca ao processo.

2.4.1. Pós Combustão

No processo de pós combustão, conforme o nome sugere, o dióxido de carbono é removido da corrente gasosa oriunda da combustão (LEUNG; CARAMANNA; MAROTO-VALER, 2014), ou seja, captura-se o CO₂ depois de ocorrida a combustão. Apesar de haver uma série de tecnologias comercialmente disponíveis para a captura de CO₂ a partir do gás de combustão, esses sistemas normalmente utilizam um solvente líquido para tal, através do

processo de absorção química. Isso porque a absorção oferece alta eficiência e seletividade, e menor custo e consumo de energia se comparado a outros processos existentes (IPCC, 2005). Nesse caso, faz-se uso da natureza reversível da reação química entre um solvente aquoso alcalino, normalmente uma amina, com um gás ácido ou azedo (IPCC, 2005). A reação reversível do dióxido de carbono com a monoetanolamina (MEA), solvente alcalino mais amplamente utilizado nos sistemas de captura de pós combustão por absorção, está representada na equação (1).



Devido à temperatura elevada, geralmente acima de 100°C, do gás oriundo da combustão, é necessário que ele seja resfriado antes do processo de absorção. Além disso, deve-se fazer um pré-tratamento do gás de combustão a fim de remover material particulado e componentes ácidos como NO_x e SO_x presentes na corrente gasosa. A remoção de material particulado é importante para evitar a contaminação do solvente bem como entupimentos no equipamento caso esteja presente em grande quantidade. Já compostos como NO_x e SO_x apresentam interação de caráter irreversível com o solvente alcalino, a qual leva à formação de sais termicamente estáveis, como o sulfato de sódio (NaSO₄) e o nitrato de sódio (NaNO₃). Assim, a sua presença compromete a capacidade de absorção de CO₂ do solvente e pode levar à formação de sólidos na solução, além de aumentar o consumo de reagentes para recuperação do solvente e gerar uma nova corrente de resíduos (IPCC, 2005).

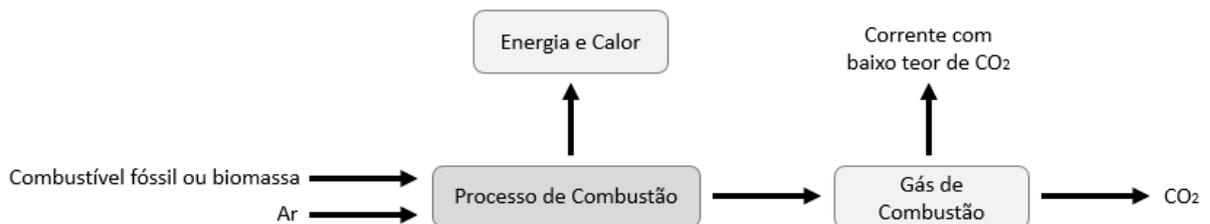
Após o pré-tratamento e o resfriamento do gás de combustão, a corrente gasosa entra em contato com o solvente alcalino na chamada torre de absorção. A temperatura é mantida tipicamente entre 40 e 60°C, e a pressão, elevada, no interior da torre também deve ser controlada a fim de se maximizar a absorção de CO₂ pelo solvente. A corrente gasosa passa, então, por uma seção de lavagem, para remoção de solvente que tenha sido carregado e ajuste da

concentração de solvente, antes de sair da torre de absorção. Quanto maior a altura da torre, menor a concentração de CO₂ que se consegue atingir na corrente gasosa de saída (IPCC, 2005).

A corrente líquida, rica em CO₂, é bombeada para uma torre de regeneração, também conhecida como *stripper*, onde ocorre a recuperação do solvente líquido. Nesse caso, trabalha-se com temperaturas mais elevadas, entre 100 e 140°C, e pressão próxima da atmosférica. Vapor d'água atua como gás de *stripping*, e a corrente gasosa, rica em CO₂, deixa a torre de regeneração e passa por um condensador, onde o gás carbônico é separado devido à condensação da água. A água, então, é aquecida novamente a vapor d'água para retornar à torre de regeneração, ao passo que a corrente de solvente, de saída do *stripper*, retorna à torre de absorção após ser resfriada (IPCC, 2005).

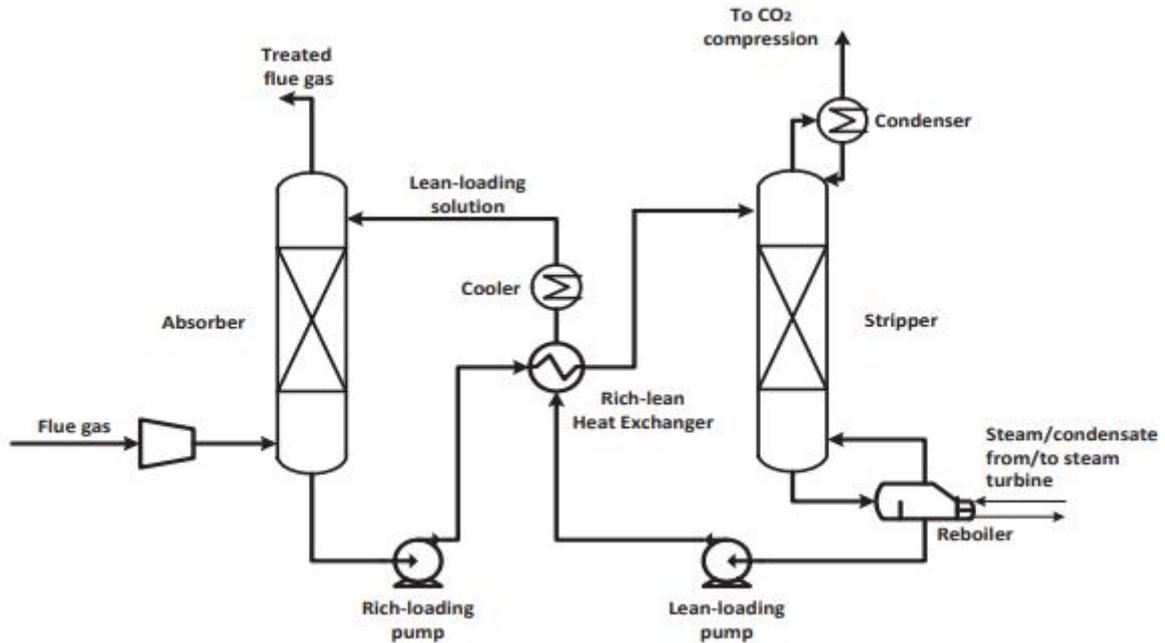
Na Figura 6, encontra-se uma representação simplificada do processo de pós combustão. Já o diagrama de processo simplificado de um sistema comercial de captura de CO₂ a partir de gás de combustão por absorção está ilustrado na Figura 7.

Figura 6: Representação do processo de pós combustão



Fonte: Adaptado de IEA, 2019

Figura 7: Diagrama simplificado de processo de captura de CO₂ a partir de gás de combustão por absorção química



Fonte: WANG et al, 2016

A princípio, os sistemas de captura de pós combustão por absorção química podem ser empregados após a queima de qualquer tipo de combustível (IPCC, 2005). Entretanto, dependendo do combustível e, conseqüentemente, das impurezas contidas no mesmo, o design, o desempenho e o custo do sistema de captura podem sofrer variações (RAO; RUBIN, 2002).

Conforme mencionado anteriormente, além da absorção química existem outras tecnologias, ainda que menos utilizadas, as quais podem ser empregadas nos sistemas de captura de pós combustão. Dentre elas, podem ser citadas a adsorção, a separação por membranas e a destilação criogênica (WANG et al, 2016).

De uma forma geral, podem ser mencionados como possíveis barreiras para a utilização de sistemas de pós combustão a baixa pressão parcial do dióxido de carbono no gás de combustão, como é o caso de plantas de geração de energia a partir do carvão. Como o gás de combustão encontra-se à pressão atmosférica e a concentração de CO₂ na corrente gasosa

oriunda da queima não é muito alta – entre 13 e 15% - a força motriz para a sua separação pode não ser tão significativa. Outro problema é que a vazão de gás de combustão costuma ser consideravelmente maior – entre 5 e 10 vezes – do que as correntes as quais são geralmente tratadas em plantas industriais, dificultando a sua manipulação (WANG et al, 2016).

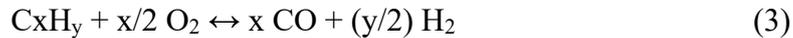
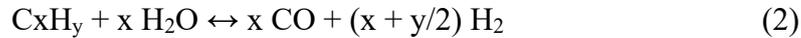
2.4.2. Pré-Combustão

Conforme o nome sugere, na pré-combustão o CO₂ é capturado anteriormente à combustão (ANWAR et al, 2018). O processo de captura de pré-combustão envolve a gaseificação ou oxidação parcial de combustível para produção de dióxido de carbono e hidrogênio (H₂), os quais são separados geralmente através de processos de absorção. O hidrogênio pode ser submetido, então, à combustão em uma turbina de gás modificada ou em uma célula combustível, gerando energia e água (UK CCS RESEARCH CENTRE, 2019).

Este processo geralmente é realizado em gaseificação integrada ao ciclo combinado (IGCC, do inglês *Integrated Gasification Combined Cycles*), a qual consiste em uma associação de processos que permite gerar vapor d'água, eletricidade e hidrogênio (RODRIGUES, 2010).

A primeira etapa da pré-combustão consiste na produção de uma mistura de hidrogênio e monóxido de carbono, também conhecida como gás de síntese, a partir de um combustível primário. As duas principais rotas para tal são através da adição de vapor d'água ou de oxigênio (O₂) ao combustível. No primeiro caso, o processo é denominado reforma a vapor, ao passo que, na adição de O₂, o processo é normalmente denominado oxidação parcial quando se trabalha com combustíveis líquidos ou gasosos e gaseificação quando o combustível utilizado é sólido (IPCC, 2005).

As reações que ocorrem na reforma a vapor e na oxidação parcial/gaseificação estão representadas em (2) e (3), respectivamente.



A segunda etapa do processo, por sua vez, consiste na reação de *shift*, representada em (4), em que o monóxido de carbono é convertido em dióxido de carbono através da adição de vapor d'água (IPCC, 2005). A mistura gasosa que deixa o reator de *shift* normalmente apresenta concentração de gás carbônico entre 15 e 60% em base seca e pressão entre 2 e 7 Mpa, o que permite uma separação mais eficiente do CO₂ através, por exemplo, da absorção em solução de amina ou da utilização de absorventes físicos como o Selexol, solvente utilizado para remover gases ácidos (STEENEVELDT; BERGER; TORP, 2006).



Também é muito utilizado para a separação o processo PSA (do inglês, *Pressure Swing Adsorber*), no qual gases que não o hidrogênio são adsorvidos em camadas de adsorvente sólido, como carvão ativado, alumina ou zeólitas. Consegue-se, assim, alcançar correntes de H₂ com pureza de até 99,999%, além de se obter uma corrente de CO₂ após a regeneração do adsorvente (IPCC, 2005).

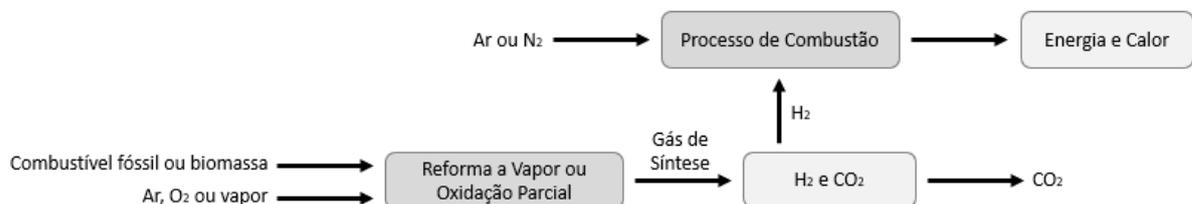
A reforma a vapor é a tecnologia dominante para a produção de hidrogênio, e o combustível primário é, em geral, o gás natural, sendo possível também a utilização de outros hidrocarbonetos leves, como a nafta. Inicialmente, compostos de enxofre presentes no combustível são removidos a fim de se evitar o envenenamento do catalisador utilizado e em seguida o vapor d'água é adicionado. A reação de reforma é endotérmica, catalisada e ocorre a altas temperaturas (800-900°C). Em seguida, o gás reformado é resfriado em uma caldeira de

calor residual e direcionado para o sistema de *shift*, onde reatores de *shift* em um ou dois estágios são utilizados para conversão do CO em CO₂. A temperatura de operação dos reatores de *shift* depende do catalisador utilizado, estando entre 400 e 550°C para catalisador a base de ferro e cromo, e entre 180 e 350°C para catalisadores a base de cobre. Por fim, a corrente de saída é resfriada e direcionada para a etapa de separação (IPCC, 2005).

No processo de oxidação parcial, por sua vez, o combustível primário reage com oxigênio em alta pressão, sendo o processo exotérmico e conduzido a altas temperaturas – em geral, entre 1250 e 1400°C. Uma vez ocorrida a reação, o gás de síntese resultante é, assim como descrito anteriormente, resfriado, submetido à reação de *shift* e à etapa de separação de CO₂. A eficiência da tecnologia de oxidação parcial é inferior à da reforma a vapor, mas a variedade de combustíveis os quais podem ser utilizados como primários é consideravelmente maior. (IPCC, 2005)

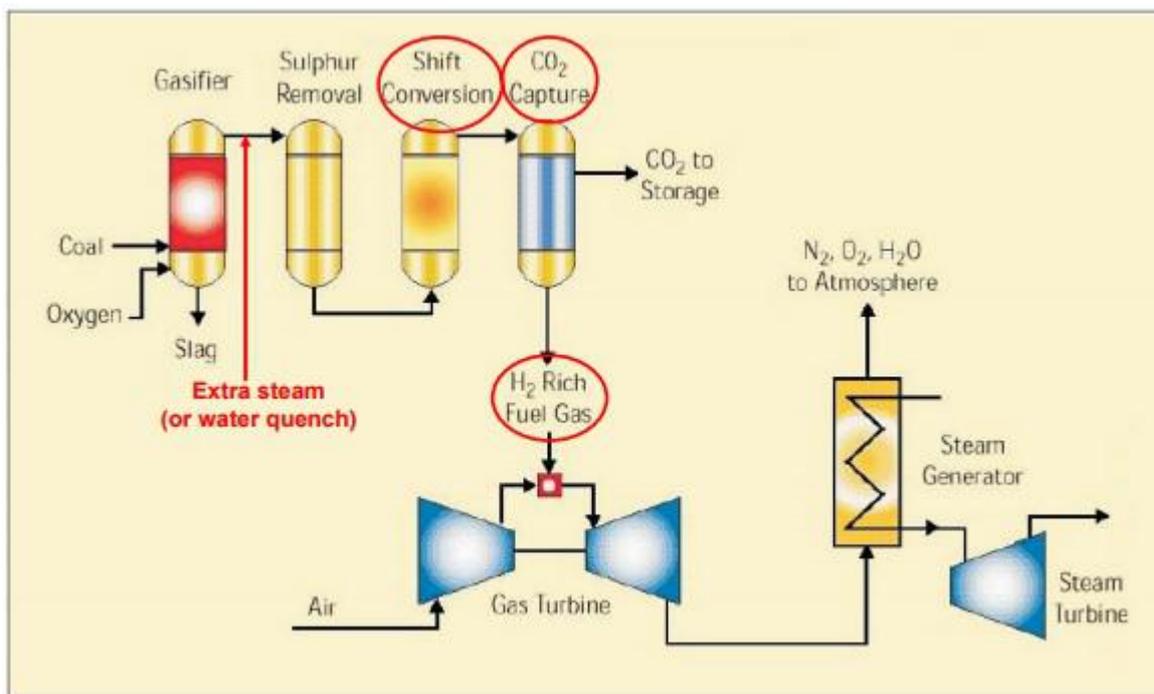
Na Figura 8, encontra-se uma representação simplificada do processo de pré-combustão. Já na Figura 9 tem-se um diagrama simplificado do processo de pré-combustão o qual utiliza carvão como combustível primário.

Figura 8: Representação do processo de pré-combustão



Fonte: Adaptado de IEA, 2019

Figura 9: Diagrama simplificado do processo de pré-combustão



Fonte: GIBBINS, 2006

Uma aplicação para a captura por pré-combustão é a produção de um combustível sem carbono (do inglês, *carbon free*): o hidrogênio. Vale ressaltar que o produto H_2 obtido não é necessariamente puro, podendo conter traços de metano, monóxido ou dióxido de carbono, mas ainda assim contribui para a redução de emissões de CO_2 . A segunda aplicação é a redução do conteúdo de carbono nos combustíveis, uma vez que combustíveis com baixa proporção H:C podem ser convertidos em outros com maior proporção. Isso pode acontecer, por exemplo, através da oxidação parcial ou gaseificação de carvão e posterior conversão do gás de síntese obtido em outros combustíveis líquidos com maior relação H:C (IPCC, 2005).

A pré-combustão apresenta como vantagens o fato de diferentes combustíveis poderem ser utilizados, além da possibilidade de se utilizar o próprio H_2 produzido como combustível ou produto. Já como desvantagens podem ser citados os elevados custos de implantação da unidade industrial (UK CCS RESEARCH CENTRE, 2019).

2.4.3. Processo *Oxy-Fuel*

No processo *oxy-fuel*, utiliza-se gás oxigênio (O₂) puro, em vez de ar, na queima do combustível (LEUNG; CARAMANNA; MAROTO-VALER, 2014). Nesse caso, no entanto, a combustão ocorre, teoricamente, a temperaturas de cerca de 3500°C, o que não é suportado pelos materiais geralmente utilizados na construção das caldeiras, haja vista que o limite de temperatura para as tecnologias atuais de combustão *oxy-fuel* é de cerca de 1900°C (IPCC, 2005). Sendo assim, parte do gás de combustão é retornado para a câmara de combustão a fim de controlar a temperatura da queima, ao passo que o restante é desidratado para se obter uma corrente com alta pureza de CO₂ (IEA, 2019).

O oxigênio puro é obtido normalmente nas chamadas unidades de separação do ar (ASU, do inglês *Air Separation Unit*) (IEA, 2019), as quais podem combinar processos de destilação criogênica, adsorção através de uma combinação de destilação criogênica, purificação por adsorção e compressão interna de produtos de alta pressão (AIR LIQUIDE, 2019).

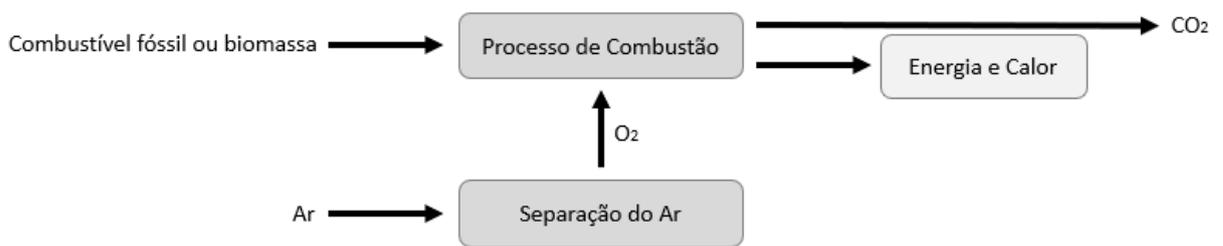
Os produtos da combustão consistem majoritariamente em dióxido de carbono e vapor d'água, além do excesso de oxigênio, usado para garantir queima completa do combustível. Além disso, também estarão presentes impurezas como SO_x, NO_x, HCl e Hg, derivados do combustível utilizado, e componentes inertes como nitrogênio e argônio, em função da presença de diluentes na corrente de O₂ ou de inertes no combustível e de vazamentos de ar para dentro do sistema. O gás de combustão pode conter, ainda, material particulado, o qual pode ser removido da corrente através de precipitação eletrostática (LEUNG; CARAMANNA; MAROTO-VALER, 2014; IPCC, 2005).

Após a queima, o gás de combustão é resfriado a fim de condensar o vapor d'água, podendo-se obter entre 80 e 98% de CO₂, dependendo do combustível utilizado e das particularidades do processo *oxy-fuel* empregado. A corrente concentrada de dióxido de

carbono obtida pode passar, então, por compressão, secagem e purificação antes de ser transportada (IPCC, 2005).

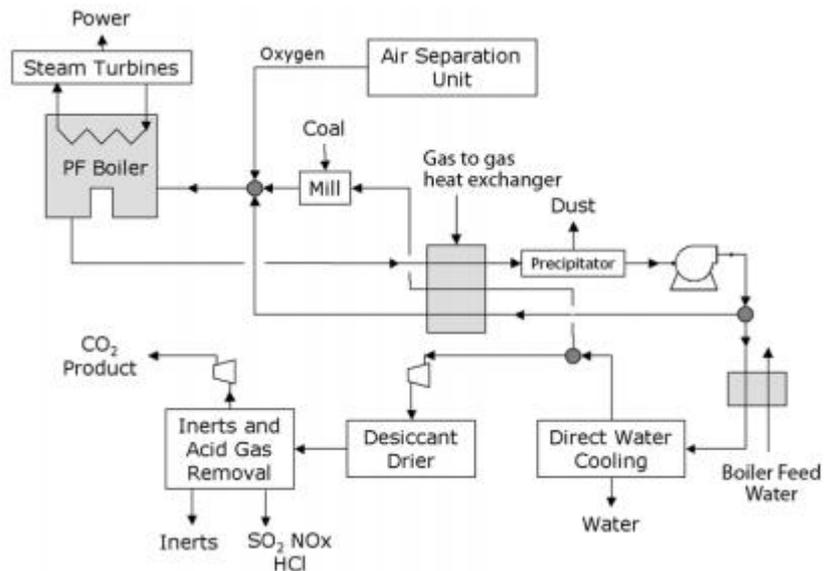
Na Figura 10, encontra-se uma representação simplificada do processo *oxy-fuel*. Já a Figura 11 apresenta um diagrama de processo de uma planta *oxy-fuel* na qual o combustível utilizado é carvão pulverizado.

Figura 10: Representação do processo *oxy-fuel*



Fonte: Adaptado de IEA, 2019

Figura 11: Diagrama de processo de uma planta *oxy-fuel* com carvão pulverizado como combustível



Fonte: IPCC, 2005

As taxas de captura de gás carbônico pelo processo *oxy-fuel* são bastante elevadas, sendo possível obter eficiência próxima a 100%. Entretanto, impurezas no combustível podem tornar necessária uma purificação adicional da corrente de CO₂ e, por isso, esse processo não é tão adequado para combustíveis de baixa qualidade (ZERO EMISSION RESOURCE ORGANISATION, 2019).

Ademais, apesar de ser tecnicamente viável, o processo *oxy-fuel* implica em elevado gasto energético, uma vez que as unidades de separação do ar, das quais se obtém o oxigênio puro, apresentam alta demanda por energia. Consequentemente, o emprego do processo *oxy-fuel* resulta em maiores custos e consumo de energia se comparado a uma planta que não faz uso dessa tecnologia (LEUNG; CARAMANNA; MAROTO-VALER, 2014).

Atualmente, existem pesquisas tanto para o desenvolvimento de membranas como alternativa tecnológica para a separação do ar como de novas tecnologias *oxy-fuel*, como a combustão *oxy-fuel* pressurizada, a fim de reduzir o consumo energético (IEA, 2019).

2.4.4. Processo *Chemical Looping Combustion*

A combustão *Chemical Looping* (CLC) foi proposta originalmente por Richter e Knoche em 1983. Nela, a ideia principal é dividir a combustão em reações intermediárias de oxidação e redução as quais são realizadas separadamente através da introdução de um óxido metálico apropriado para atuar como transportador de oxigênio e circular entre os dois reatores (STEENEVELDT; BERGER; TORP, 2006; IPCC, 2005).

Diferentemente do processo *oxy-fuel*, na CLC não é necessária a presença de uma unidade de separação do ar na planta, uma vez que, ao invés de utilizar diretamente oxigênio puro na combustão, a separação de O₂ do ar se dá através da sua fixação na forma de um óxido

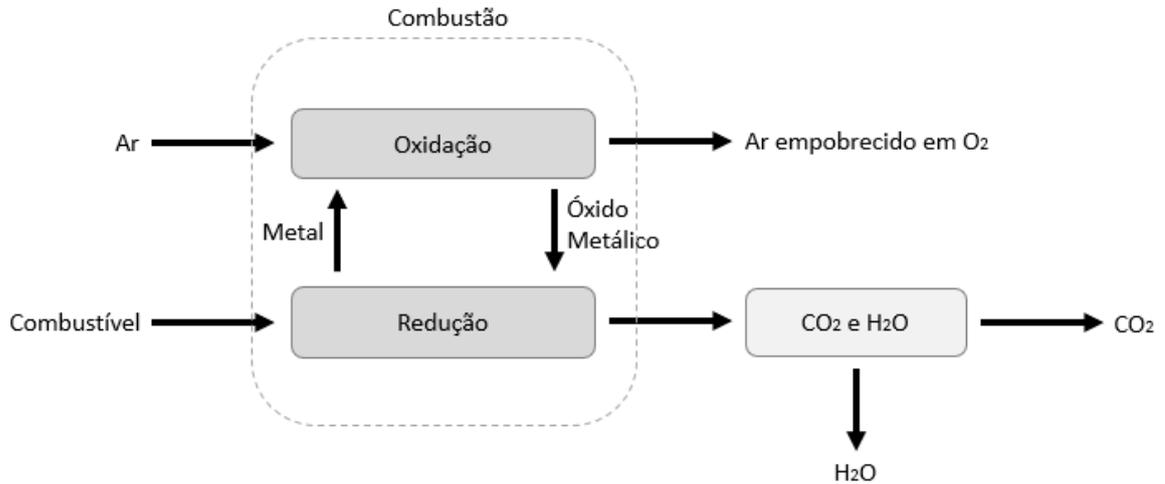
metálico. Existe uma variedade de óxidos de baixo custo os quais são apropriados para esse processo, como o óxido férrico (Fe_2O_3), óxido de níquel (NiO), óxido cúprico (CuO) e o trióxido de dimanganês (Mn_2O_3). Durante o processo, o óxido é reduzido a metal, enquanto o combustível é oxidado a CO_2 e água. Em seguida, o metal é oxidado e reutilizado no processo (LEUNG; ARAMANNA; MAROTO-VALER, 2014; IPCC, 2005).

O metal e o seu óxido correspondente podem ser utilizados em formas variadas, porém geralmente se utilizam partículas com diâmetro entre 100-500 μm . Apesar de haver diferentes formas de se realizar a combustão *chemical looping*, a fluidização das partículas apresenta algumas vantagens, pois, além de permitir a sua circulação entre os dois reatores, também garante transferências de calor e massa eficientes entre os gases e o material sólido (STEENEVELDT, BERGER e TORP, 2006; IPCC, 2005).

A reação entre o combustível e o oxigênio ocorre no segundo reator, no qual o oxigênio é liberado do óxido metálico devido à atmosfera redutora causada pela presença de hidrocarboneto ou outro combustível carbonáceo. Para evitar a deposição de carbono nesse reator, é necessário adicionar, junto ao combustível, certa quantidade de vapor d'água. Já no primeiro reator ocorre a oxidação do metal. A taxa de circulação do material sólido entre os dois reatores bem como seu tempo médio de residência em cada um deles controlam o balanço de calor e a temperatura, a qual se encontra na faixa de 800 a 1200°C em ambos os reatores (IPCC, 2005).

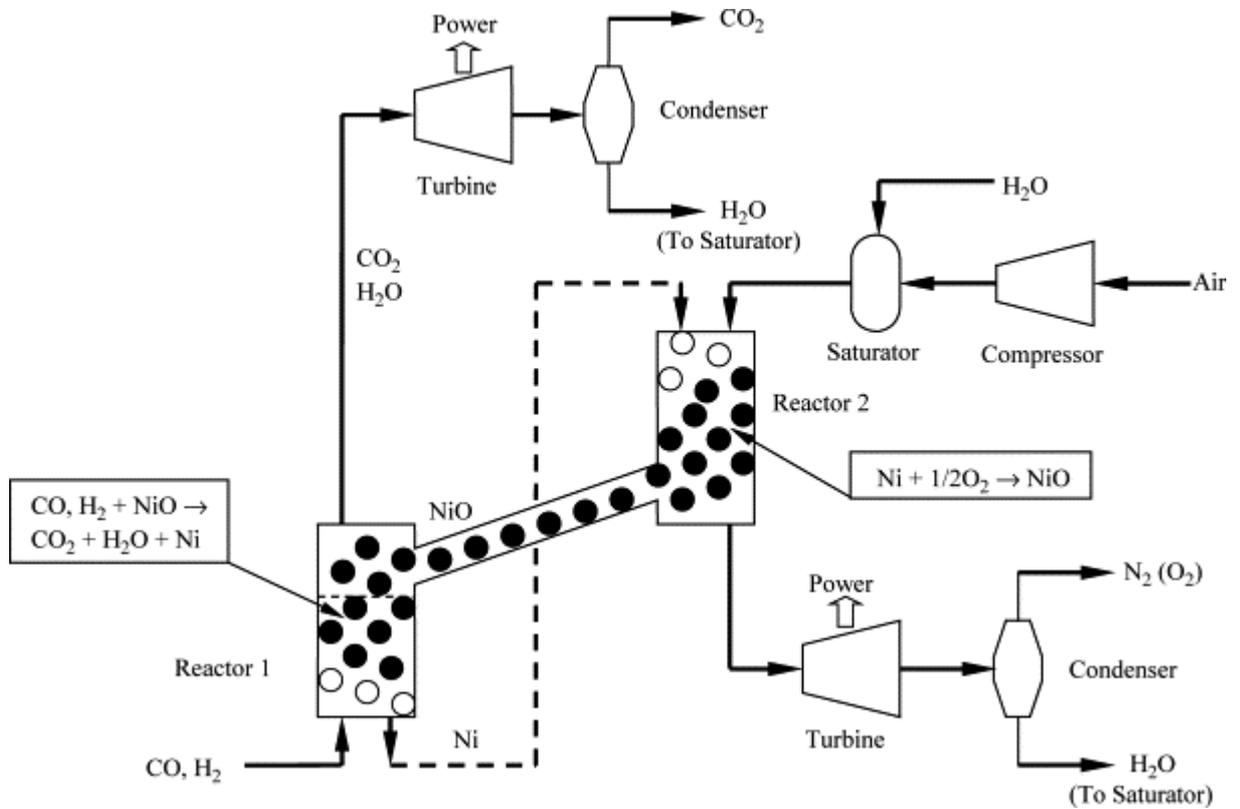
Na Figura 12, encontra-se uma representação simplificada do processo de combustão *chemical looping*. Já na Figura 13 está ilustrado um diagrama simplificado do processo em que se utiliza óxido de níquel como transportador de oxigênio.

Figura 12: Representação do processo de combustão *chemical looping*



Fonte: Adaptado de IPCC, 2005

Figura 13: Diagrama de processo de combustão *chemical looping* utilizando óxido de níquel como transportado de oxigênio



Fonte: JIN; ISHIDA, 2004

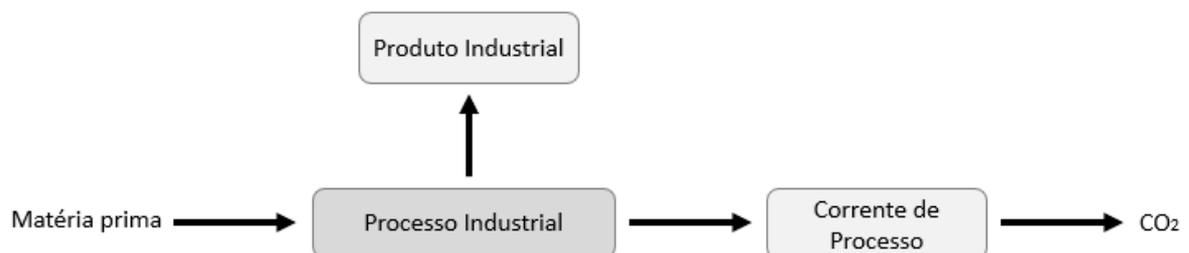
A vantagem de se realizar a combustão em dois reatores, se comparado com a combustão convencional em um único estágio, é que o dióxido de carbono obtido não se encontra diluído em gás nitrogênio. Desse modo, após a separação do vapor d'água, o CO₂ encontra-se praticamente puro, sem haver a necessidade de outros gastos energéticos ou equipamentos adicionais para a sua separação. Entretanto, podem ser citados como ponto crítico do processo as estabilidades mecânica e química no longo prazo das partículas as quais são submetidas a ciclos repetitivos de oxidação e redução, importante para minimizar a necessidade de reposições (IPCC, 2005).

2.4.5. Separação Inerente

Alguns processos na indústria e na produção de combustível geram correntes de dióxido de carbono de alta pureza como uma etapa intrínseca ao processo, como, por exemplo, no processamento de gás e na produção de etanol: é a chamada separação inerente. O custo de captura é variável de acordo com a fonte produtora (IEA, 2019).

Na Figura 14, encontra-se uma representação do processo de separação inerente.

Figura 14: Representação do processo de separação inerente



Fonte: Adaptado de IEA, 2019

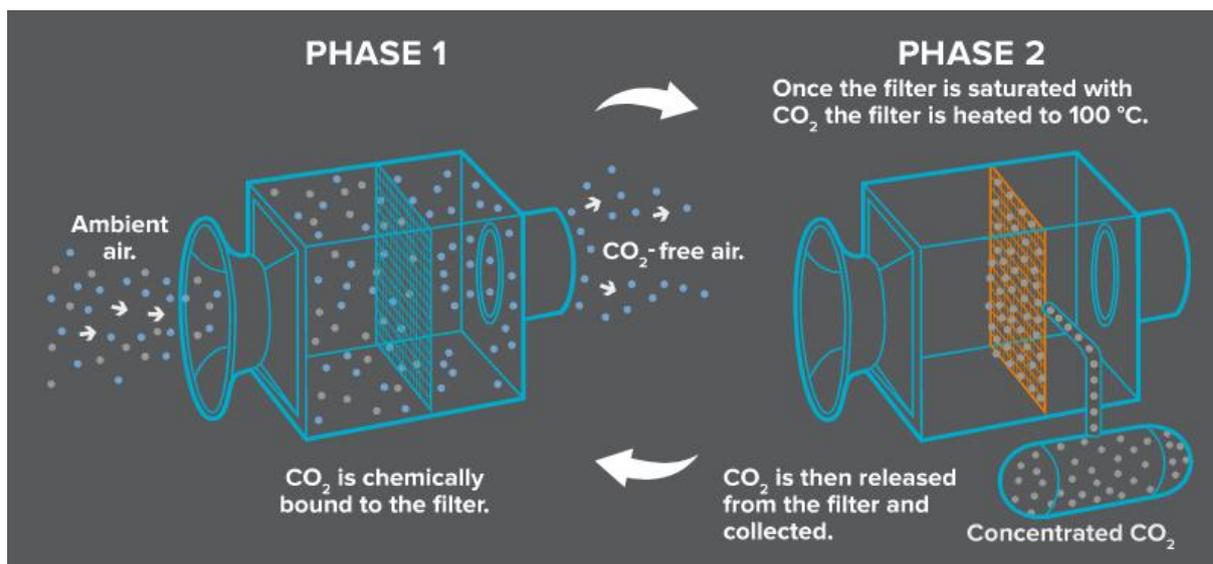
2.4.6. Captura Direta do Ar

A captura direta de CO₂ do ar (DAC, do inglês *Direct Air Capture*) tem como objetivo fazer uso dos conceitos e tecnologias desenvolvidos para a captura de dióxido de carbono presente no gás de combustão e aplicá-los à captura de CO₂ presente em concentrações ultra diluídas no ar (KULKARNI; SHOLL, 2012).

Existem dois grupos promissores de tecnologias DAC. O primeiro consiste na utilização de soluções aquosas contendo hidróxidos para realizar a extração. Nesse caso, são necessárias altas temperaturas (acima de 800°C) para a regeneração da solução, as quais costumam ser fornecidas através da queima de gás natural. A segunda tecnologia, por sua vez, se baseia na utilização de adsorventes a base de aminas ligadas a um suporte sólido poroso. Nesse caso, o processo opera entre 85°C e 120°C, demandando menor quantidade energia térmica (IPCC, 2019; KOYTSOUMPA; BERGINS; KAKARAS, 2018).

Um exemplo de tecnologia utilizada para DAC foi desenvolvido pela empresa *startup Climeworks* (Figura 15). Nesse caso, a captura ocorre através de um filtro: o ar é aspirado para dentro da planta e o dióxido de carbono se liga quimicamente ao filtro. Uma vez atingida a condição de saturação, o filtro é aquecido até cerca de 100°C, e o CO₂ liberado é coletado em uma corrente concentrada. Já o ar livre de gás carbônico é liberado novamente para a atmosfera. Esse ciclo é repetido continuamente, podendo o filtro ser reutilizado por vários milhares de ciclos. Atualmente, o custo de captura dessa tecnologia é estimado na faixa de US\$500 a US\$700 por tonelada de CO₂, e a empresa espera reduzir esse custo para US\$100 a fim de conseguir acessar um mercado maior e ampliar a escala de sua tecnologia (CLIMEWORKS, 2019; IPCC, 2019).

Figura 15: Tecnologia de captura de CO₂ do ar desenvolvido pela startup *Climeworks*



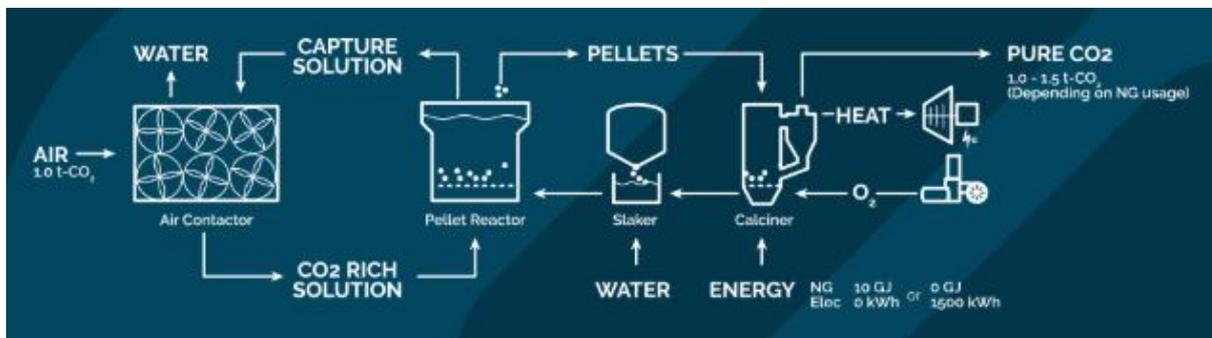
Fonte: CLIMEWORKS, 2019

Outro exemplo de tecnologia para captura de gás carbônico direta do ar foi desenvolvido pela *startup Global Thermostat*. Nesse processo, adsorventes a base de amina se ligam a monolitos cerâmicos porosos, atuando, no conjunto, como esponjas de carbono as quais adsorvem o CO₂ direto da atmosfera. O dióxido de carbono adsorvido é coletado utilizando vapor d'água de baixa temperatura, sendo possível a obtenção de correntes com 98% de CO₂. Nos Estados Unidos, a empresa já construiu duas instalações em escala piloto, cada uma com capacidade de remover entre 3.000 e 4.000 toneladas de gás carbônico por ano (GLOBAL THERMOSTAT, 2019; IPCC, 2019)

A *startup Carbon Engineering*, por sua vez, desenvolveu uma tecnologia de DAC a qual, através de uma série de reações químicas, extrai o dióxido de carbono do ar (Figura 16). Inicialmente, o ar é aspirado para dentro do primeiro equipamento, onde entra em contato com uma solução de hidróxido de potássio a qual interage com as moléculas de CO₂, formando carbonato de potássio. Depois, o sal é separado da solução, sendo transferido para pequenas estruturas denominadas *pellets*, as quais, em seguida, são aquecidas para liberar o CO₂ na forma

de gás puro. Já os *pellets* são hidratados e recirculados para o início do sistema (CARBON ENGINEERING, 2019).

Figura 16: Tecnologia de captura de CO₂ do ar desenvolvido pela startup *Carbon Engineering*



Fonte: Carbon Engineering, 2019

A captura de CO₂ diretamente do ar apresenta como vantagem, se comparada com os processos de captura apresentados anteriormente, o potencial de capturar dióxido de carbono de diferentes fontes de emissão, não tendo sua aplicação restrita a grandes fontes estacionárias. Além disso, observa-se, nos projetos existentes citados, consumo reduzido de energia se comparado aos processos ligados à combustão (KOYTSOUMPA; BERGINS; KAKARAS, 2018; KULKARNI; SHOLL, 2012).

No entanto, existe ainda certo receio em relação à tecnologia DAC no que diz respeito à quantidade de energia ou água demandada para extrair baixas concentrações de gás carbônico da atmosfera. O custo atual da tecnologia é outro obstáculo a ser superado, visto que pode reduzir o interesse por sua implantação em larga escala (IPCC, 2019).

2.5. Armazenamento de CO₂

A captura e armazenamento de carbono (CCS, do inglês *Carbon Capture and Storage*) envolve a injeção de dióxido de carbono capturado de diferentes fontes em reservatórios

geológicos subterrâneos profundos de rocha porosa cobertos por uma camada rochosa impermeável a qual impede a migração ascendente do CO₂ para além do complexo de armazenamento (IEA, 2019).

Quando o dióxido de carbono é injetado no subsolo, ele adquire condição supercrítica em função da pressão associada, o que significa que ele assume densidade de líquido (entre 500 e 800 kg/m³), mas se expande como um gás, permitindo um preenchimento mais eficiente do espaço disponível no reservatório, além de aumentar a segurança do armazenamento. Para que o CO₂ seja retido em estado denso e fluido, portanto, o reservatório deve estar a profundidades superiores a 800 metros de forma a garantir o seu estado supercrítico (IEA, 2019; IPCC, 2005).

A seleção de sítios geológicos adequados para armazenagem de CO₂ leva em consideração diferentes características, como porosidade, espessura e permeabilidade da rocha a ser utilizada como reservatório, além da capacidade de vedação da rocha de cobertura e da estabilidade do meio geológico. Outros pontos, como a distância do reservatório até a fonte do gás carbônico, a capacidade efetiva de armazenagem, a existência de possíveis caminhos para vazamento e restrições econômicas em geral, também influenciam na viabilidade de utilização de um sítio como local de armazenagem. (LEUNG; CARAMANNA; MAROTO-VALER, 2014)

São três os tipos de formações geológicas mais propícios para o armazenamento de CO₂: reservatórios de óleo e gás, aquíferos salinos e reservas profundas de carvão. O potencial de armazenagem global para os aquíferos salinos está entre 400 e 10.000 Gt, cerca de 920 Gt para os reservatórios de óleo e gás e pelo menos 15Gt para as reservas de carvão. (LEUNG; CARAMANNA; MAROTO-VALER, 2014)

Reservatórios de óleo e gás são formações rochosas porosas as quais contêm principalmente petróleo bruto ou gás armazenados há milhões de anos. Ao se introduzir CO₂

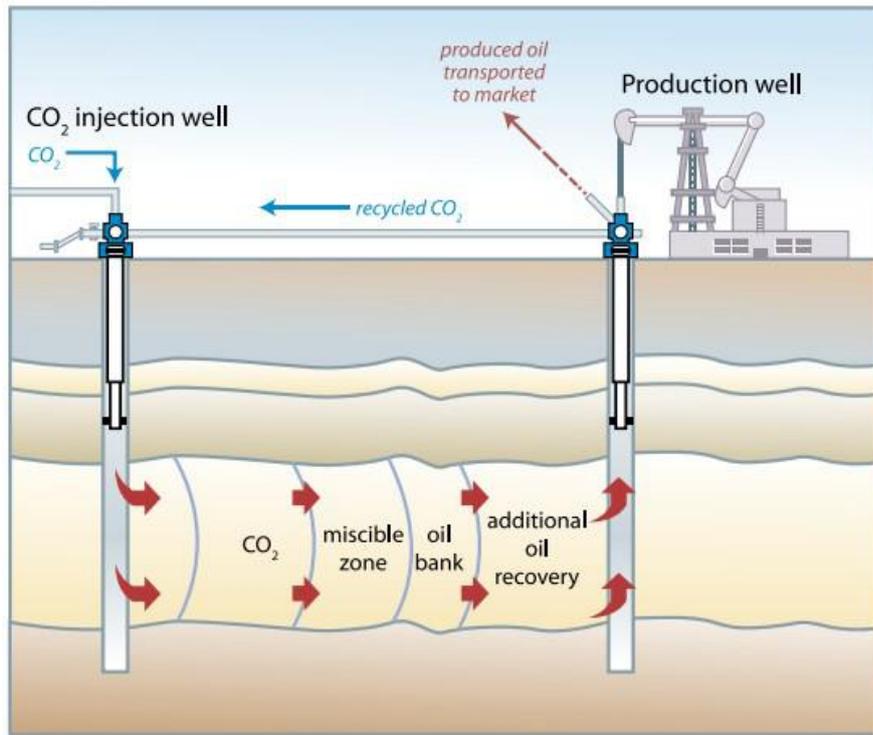
no interior de reservatórios depletados, isto é, exauridos, aumenta-se a pressão em seu interior, proporcionando a força motriz necessária para extração de óleo ou gás residual ali contido. Parte do dióxido de carbono retorna à superfície misturado ao óleo, sendo recuperado e injetado novamente, porém uma parte fica armazenada permanentemente no reservatório. (IEA, 2019; LEUNG; CARAMANNA; MAROTO-VALER, 2014)

É esse o princípio por trás dos projetos de EOR (do inglês, *Enhanced Oil Recovery*): através da injeção de fluidos no interior de um reservatório ativo, consegue-se extrair até 40% do óleo residual. Foi a partir do EOR, inclusive, que surgiu, no início da década de 1970, a prática de introduzir CO₂ em formações geológicas subterrâneas, inicialmente realizada no estado do Texas, nos Estados Unidos. (LEUNG; CARAMANNA; MAROTO-VALER, 2014; IPCC, 2005)

O armazenamento de CO₂ em reservatórios dessa natureza (CO₂-EOR) apresenta, portanto, um incentivo econômico devido à possibilidade de incremento da produção de óleo e gás, sendo a receita oriunda da venda de dióxido de carbono capturado para projetos de EOR fundamental para garantir investimentos em instalações de captura e armazenamento de CO₂. A tecnologia de CO₂-EOR já é comercialmente bem estabelecida, abrangendo, atualmente, cerca de dois terços dos projetos em andamento que fazem uso de CO₂ obtido por captura. (IEA, 2019; LEUNG; CARAMANNA; MAROTO-VALER, 2014; IPCC, 2005)

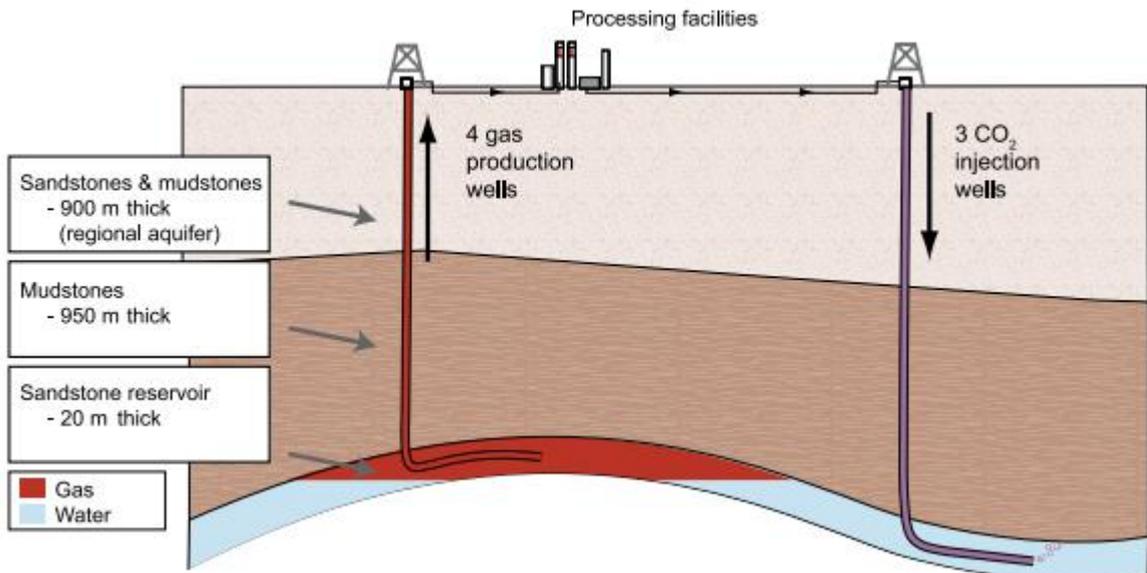
Na Figura 17, encontra-se uma representação simplificada do processo de CO₂-EOR. Já na Figura 18 encontra-se uma representação do primeiro projeto em larga escala de armazenamento de CO₂ em um reservatório de gás, denominado *In Salah Gas Project*. Ele foi iniciado em 2004 e está localizado na região saariana central da Argélia, sendo estimado um armazenamento de 17 Mt de CO₂ no decorrer do projeto.

Figura 17: Representação simplificada do processo de CO₂-EOR



Fonte: IPCC, 2005

Figura 18: Representação do projeto *In Salah Gas Project*, na região central da Argélia

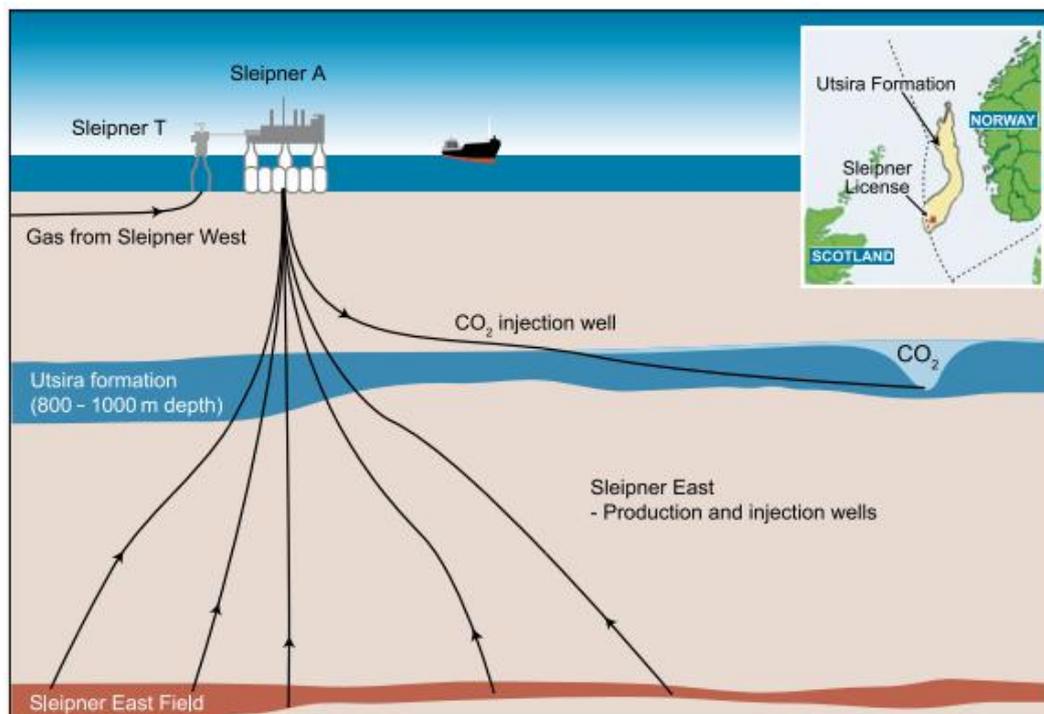


Fonte: IPCC, 2005

Aquíferos salinos, por sua vez, são camadas de rocha porosa e permeável saturada com salmoura, ou seja, água com alta concentração de sal, sendo encontrados em bacias sedimentares tanto *onshore* quanto *offshore* (IEA, 2019). Ainda que não possuam aplicação comercial, eles apresentam elevado potencial para armazenamento de CO₂ (LEUNG; CARAMANNA; MAROTO-VALER, 2014).

O melhor exemplo de armazenagem de CO₂ em formação salina é o projeto *Sleipner* no Mar do Norte, cuja representação simplificada encontra-se na Figura 19. Ele teve início em 1996 e é operado pela *Equinor*, sendo o primeiro projeto em escala comercial dedicado ao armazenamento geológico de dióxido de carbono. O CO₂ nele armazenado é oriundo da produção do campo de gás *Sleipner* oeste, na costa da Noruega. Estima-se que, ao longo do projeto, um total de 20 Mt de CO₂ seja armazenado. (IPCC, 2005)

Figura 19: Representação simplificada do projeto *Sleipner*



Fonte: IPCC, 2005

O carvão apresenta a capacidade de adsorver fisicamente gases em sua estrutura porosa, dentre eles o metano (CH₄). Em reservas profundas de carvão, improváveis de serem minadas devido à elevada profundidade em que se encontram ou à sua pequena espessura, a injeção de CO₂ pode ser utilizada para extrair esse CH₄ em um processo denominado CO₂-ECBM (do inglês, *CO₂ Enhanced Coal Bed Methane*). (LEUNG; CARAMANNA; MAROTO-VALER, 2014; IPCC, 2005)

Como o carvão apresenta maior afinidade para adsorver o dióxido de carbono do que o metano, ao se injetar gás carbônico nas reservas ele se difunde pela matriz de carvão e é adsorvido, liberando gases previamente adsorvidos na superfície dos microporos, como é caso do metano (IPCC, 2005).

A escolha de sítios para a tecnologia CO₂-ECBM leva em consideração critérios como permeabilidade, geometria do carvão, estrutura, profundidade e condições de saturação do gás (IPCC, 2005).

Inúmeros estudos apontam para a relevância da tecnologia CO₂-ECBM no que tange ao armazenamento de CO₂ e ao incremento da produção de metano CBM (do inglês, *Coal Bed Methane*). Entretanto, testes conduzidos ao redor do globo demonstraram variações consideráveis nos resultados, o que sugere acentuada dependência da localização do sítio e baixo grau de maturidade da tecnologia. (XIE et al, 2014)

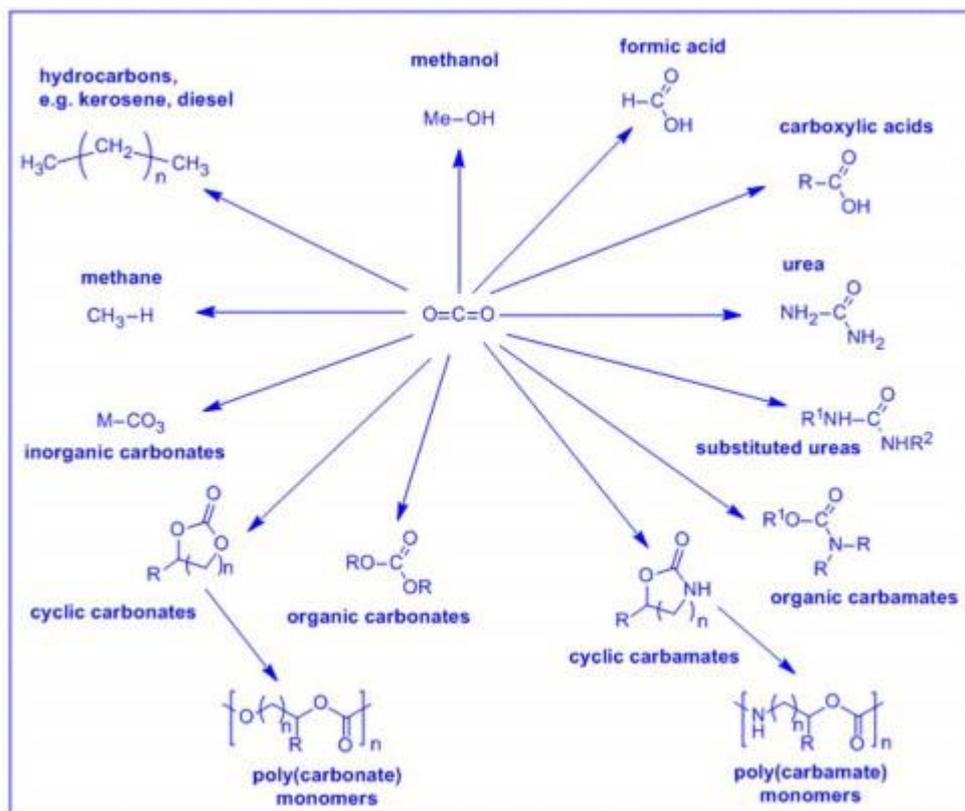
O conjunto captura e armazenagem de CO₂ (CCS, do inglês *Carbon Capture and Storage*) consiste em um meio de se evitar emissões de gás carbônico, sendo, portanto, uma medida mitigadora do cenário de mudança climática em função do aumento crescente da concentração desse gás na atmosfera. O CCS compreende tanto a captura de CO₂ a partir de grandes fontes estacionárias, quanto o seu transporte por meio de gasodutos até o local de armazenagem e a sua injeção em formações geológicas adequadas. (IPCC, 2005)

2.6. Utilização de CO₂

A captura e utilização de CO₂ (CCU, do inglês *Carbon Capture and Utilization*) procura explorar o dióxido de carbono em aplicações que vão além do armazenamento. A ideia é utilizar o CO₂ como matéria-prima para a obtenção de produtos de valor comercial. A gama de aplicações possíveis para o gás carbônico é consideravelmente extensa e inclui tanto o uso do CO₂ sem alterá-lo quimicamente quanto a sua conversão em novos produtos (IEA, 2019; KOYTSOUMPA; BERGINS; KAKARAS, 2018; IEA, 2011).

A obtenção de combustíveis e químicos baseados em CO₂ pode ocorrer por rota química ou biológica, e tem potencial para reduzir a dependência de matérias-primas petroquímicas. A Figura 20 apresenta alguns dos produtos que podem ser produzidos a partir do CO₂. Percebe-se que o dióxido de carbono é ponto de partida para a obtenção de uma vasta gama de compostos químicos com aplicação comercial. Todavia, ainda são poucos os esforços no que tange à diversificação do portfólio de produtos obtidos utilizando o dióxido de carbono como matéria-prima (IEA, 2011).

Figura 20: Produtos químicos obtidos a partir do CO₂



Fonte: IEA, 2011

Ainda são muitos os obstáculos associados à utilização de CO₂ como matéria-prima, principalmente no que diz respeito ao elevado consumo energético associado. Isso porque, devido à estabilidade de sua molécula, reações envolvendo o dióxido de carbono apresentam elevada energia de ativação. Portanto, pode-se dizer que o grande desafio para a conversão de CO₂ em novos produtos é o desenvolvimento de processos que minimizem o consumo de energia, sobretudo não renovável, sejam economicamente competitivos e proporcionem reduções substanciais tanto nas emissões de gases poluentes quanto na geração de resíduos, se comparados com as tecnologias existentes (NATIONAL ACADEMIES OF SCIENCES, ENGINEERING AND MEDICINE, 2019).

2.7. Diferenças entre Armazenamento e Utilização de Carbono

A captura e armazenagem de CO₂ (CCS) é amplamente discutida como um meio importante para a redução das emissões antropogênicas de gás carbônico, principalmente as oriundas de grandes fontes pontuais como as plantas de geração de energia. Recentemente, entretanto, começou-se a chamar atenção para o conceito de captura e utilização de CO₂ (CCU) com o objetivo de viabilizar o uso industrial de CO₂ como matéria-prima (BRUHN; NAIMS; OLFE-KRÄUTLEIN, 2016; IEA, 2011).

Apesar de bem distintos, os dois conceitos, muitas vezes, acabam se misturando nas discussões, e por isso torna-se importante explicitar suas características e particularidades.

Em linhas gerais, a CCS pode ser entendida como um instrumento de mitigação da questão climática, ao oferecer um meio de se compensar as emissões de gás carbônico, gás de efeito estufa, decorrentes das atividades humanas. Por esse motivo, existem críticas relacionadas ao potencial da CCS de prolongar o modelo de negócio da indústria atual, baseada em recursos de origem fóssil, ao invés de estimular a procura por alternativas renováveis e menos poluentes (BRUHN; NAIMS; OLFE-KRÄUTLEIN, 2016).

Já o conceito de CCU, por sua vez, se baseia na utilização do CO₂ como fonte alternativa de carbono, objetivando, portanto, reduzir a dependência de recursos de origem fóssil, fontes tradicionais de carbono. Grande parte das tecnologias de CCU, inclusive, não contribuem, por si só, para a redução das emissões de gás carbônico a longo prazo, uma vez que o armazenamento do mesmo na forma de novos produtos é temporário, sendo o CO₂ eventualmente liberado novamente para a atmosfera ao final da vida útil do produto. Os benefícios, em termos ambientais, são principalmente indiretos, ao propor o aproveitamento de um resíduo, o CO₂ gerado em outros processos, como matéria-prima. Além disso, tecnologias

de CCU geralmente procuram utilizar fontes renováveis de energia em seu processo (BRUHN; NAIMS; OLFE-KRÄUTLEIN, 2016; IEA, 2011).

Quando se compara o armazenamento com a utilização de CO₂, um ponto importante a ser destacado diz respeito ao valor agregado proporcionado por cada tecnologia. No caso do CCS, o valor agregado é negativo em função dos custos com a captura e armazenagem do dióxido de carbono bem como o aumento da demanda energética da planta ou instalação, sem que haja algum retorno econômico. Quando se fala em CCU, o valor agregado pode ser positivo, uma vez que a substituição da matéria-prima fóssil por CO₂ pode resultar na redução de custos, sobretudo quando se busca compensar os custos com a captura. Além disso, tem-se a geração de receita com a venda dos produtos obtidos, os quais apresentam valor comercial (BRUHN; NAIMS; OLFE-KRÄUTLEIN, 2016).

Convém ressaltar a possibilidade de se combinar o armazenamento com a utilização de dióxido de carbono, no conceito denominado CCUS (do inglês, *Carbon Capture, Utilization and Storage*). Nesse caso, parte do CO₂ capturado é utilizado como matéria-prima na obtenção de novos produtos ao passo que o restante é destinado à armazenagem (DOE, 2019).

A Figura 21 apresenta uma representação de alguns dos caminhos possíveis para o armazenamento e a utilização de carbono.

Figura 21: Caminhos para armazenamento e utilização de carbono



Fonte: Adaptado de IPCC, 2019

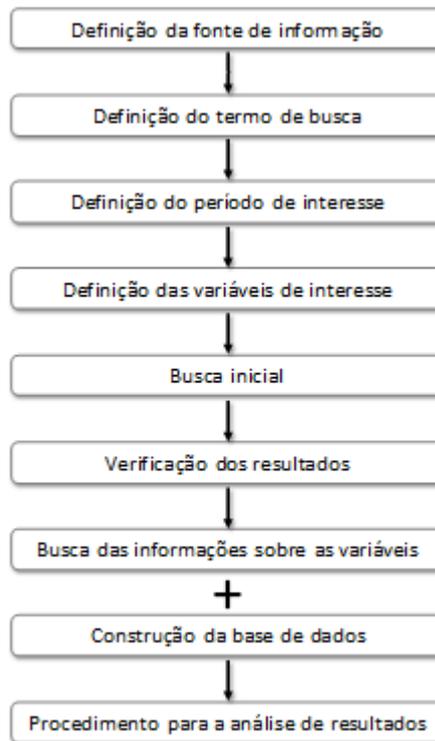
3. METODOLOGIA

Conforme exposto no capítulo anterior, a utilização do dióxido de carbono para a obtenção de produtos de valor comercial é interessante uma vez que possibilita reduzir a dependência de matérias-primas de origem fóssil bem como atribuir novas aplicações a um resíduo produzido em outros processos industriais. Todavia, a maior parcela do CO₂ capturado atualmente é destinada ao armazenamento, sobretudo em projetos envolvendo a tecnologia CO₂-EOR.

A metodologia utilizada neste trabalho, portanto, teve como objetivo a identificação de projetos os quais apresentam como proposta o aproveitamento do CO₂ como matéria-prima. Desse modo, foi possível, posteriormente, realizar uma análise em termos qualitativos e quantitativos a respeito de diferentes variáveis relativas às iniciativas mapeadas.

O fluxograma contendo as etapas da metodologia encontra-se na Figura 22, as quais são discutidas nas seções deste capítulo.

Figura 22: Etapas da metodologia



Fonte: Elaborado pela autora

3.1. Definição da Fonte de Informação

A identificação dos projetos envolvendo o uso do dióxido de carbono foi feita através do *site Biofuels Digest*, o qual consiste em uma plataforma norte-americana, gratuita e de fácil acesso, de informações e notícias globais diárias no que diz respeito à bioeconomia, isto é, à economia baseada em recursos renováveis.

3.2. Definição do Termo de Busca

O termo utilizado no campo de busca foi “CO₂”. Desse modo, foi possível ter acesso a todas as notícias veiculadas pela plataforma *Biofuels Digest* que envolvessem a molécula de interesse. Uma segunda busca, dessa vez utilizando o termo “*carbon dioxide*”, foi realizada a

fim de verificar se esta complementar a busca inicial. Entretanto, poucos resultados foram encontrados, e por isso optou-se por trabalhar apenas com o termo “CO₂”.

3.3. Definição do Período de Interesse

Foram analisadas as notícias compreendidas entre setembro de 2010 e dezembro de 2019. Inicialmente, pretendia-se analisar todas as notícias referentes aos anos 2010 a 2019, constituindo, assim, um período de dez anos, porém a base de notícias na plataforma *Biofuels Digest* relativas ao termo “CO₂” tinha início apenas em setembro de 2010. Sendo assim, estabeleceu-se como período de interesse o período relativo à totalidade de notícias disponíveis no portal.

3.4. Definição das Variáveis de Interesse

Para a análise dos projetos selecionados foram definidas uma série de variáveis de interesse, tomando-se como referência para a escolha o trabalho de Targueta, 2019. Essas variáveis podem ser divididas em cinco dimensões: características gerais, matéria-prima, tecnologia, produtos e modelo de negócio. Desse modo, foi possível direcionar a busca de informações e a análise dos projetos identificados.

A composição do conjunto de variáveis teve como objetivo possibilitar uma melhor compreensão da dinâmica de inovação no que diz respeito ao aproveitamento de CO₂, uma vez que possibilitou a coleta de informações tanto quantitativas quanto qualitativas sobre os projetos.

Na Figura 23 encontram-se listadas, em suas respectivas dimensões, as variáveis de interesse.

Figura 23: Dimensões de análise e suas respectivas variáveis de interesse



Fonte: Adaptado de TARGUETA, 2019

A dimensão de características gerais diz respeito ao local de realização do projeto e seu status atual. Ela procura, assim, situar cada projeto espacial e temporalmente.

A dimensão de modelo de negócio procura caracterizar os atores envolvidos nos projetos no que diz respeito a país de origem, setor de atuação e, no caso de empresas, sua classificação em estabelecida ou *startup*. Além disso, tem-se como objetivo identificar as relações existentes entre os atores, o número de organizações envolvidas e a fonte de recursos para as iniciativas.

A dimensão de matéria-prima, por sua vez, compreende as variáveis tipo de matéria-prima e acesso à matéria-prima. Objetiva-se analisar, assim, se o projeto já apresenta um foco para o aproveitamento de dióxido de carbono, como por exemplo determinado setor da indústria, e/ou se apresenta um fornecedor específico de CO₂.

A dimensão de tecnologia engloba as variáveis relacionadas aos aspectos tecnológicos, como tipo de captura de CO₂, rota de conversão e a fonte de energia utilizada. Ela também procura avaliar a configuração do projeto no que diz respeito à existência ou não de integração como biorrefinaria e/ou com o armazenamento de carbono, além do seu grau de maturidade.

Por fim, a dimensão de produto apresenta como objetivo caracterizar os produtos obtidos a partir do dióxido de carbono, identificando suas possíveis aplicações e classificando-os de acordo com a sua natureza.

3.5. Busca Inicial

Levando em consideração o termo de busca e o período de interesse, foram encontradas 195 notícias no portal *Biofuels Digest*. Todas as notícias foram acessadas entre dezembro de 2019 e janeiro de 2020.

3.6. Verificação dos Resultados

A partir dos resultados obtidos na busca inicial, realizou-se uma leitura das notícias a fim de selecionar aquelas que estavam de acordo com o tema de estudo, ou seja, com o aproveitamento do dióxido de carbono como matéria-prima. Desse modo, as notícias cujos temas desviavam desse assunto foram descartadas.

Foram selecionadas para a análise todas as notícias que diziam respeito à utilização de CO₂. Assim, o conjunto de notícias inicial de 195 notícias foi reduzido para 97 notícias, o que significa que 49,7% das notícias encontradas se enquadravam no tema de estudo.

Além disso, observou-se que, em alguns casos, um mesmo projeto era abordado em mais de uma notícia. Por esse motivo, a quantidade de projetos identificados foi um pouco menor que o número de notícias, totalizando 86 projetos.

A Tabela 4 apresenta um resumo das notícias e do número de projetos identificados até a etapa de verificação dos resultados.

Tabela 4: Resultados das etapas de busca inicial e verificação de resultados para a busca por “CO₂” de setembro/2010 a dezembro/2019 no *site Biofuels Digest*

Resultados obtidos pelo portal <i>Biofuels Digest</i>	
Total de notícias lidas	195
Total de notícias selecionadas	97
Total de projetos identificados	86

Fonte: Elaborado pela autora

3.7. Busca das Informações sobre as Variáveis de Análise

A análise dos projetos teve início na leitura das notícias, uma vez que uma parcela das informações relacionadas às variáveis de análise encontrava-se disponível no próprio corpo da notícia. Além disso, a plataforma *Biofuels Digest* também disponibilizava frequentemente *links* para outras páginas, externas ou do próprio portal, os quais complementavam as informações apresentadas na notícia inicial. Esses *sites* também foram utilizados para a coleta de dados.

Na maioria dos casos, entretanto, essas fontes não foram suficientes para obter todas as informações relativas às variáveis de interesse. Por esse motivo, foi realizada uma busca complementar, tanto nos *sites* dos próprios atores envolvidos nos projetos quanto nas plataformas *CrunchBase* e *i3*, as quais apresentam bancos de dados sobre o perfil de empresas públicas e privadas.

Convém ressaltar, entretanto, que não foi possível encontrar informações sobre todas as variáveis de interesse definidas inicialmente para os projetos. Além disso, a quantidade de informações disponíveis em relação a cada projeto foi variável, resultando em projetos com diferentes níveis de detalhamento para a posterior análise. Ainda assim, nenhum projeto foi descartado em função da carência de informações.

3.8. Construção da Base de Dados

A base de dados foi elaborada no programa *Excel*, no formato de uma tabela em que cada linha representava um projeto e cada coluna representava uma variável de interesse.

A etapa de construção da base de dados se deu concomitantemente à etapa anterior, uma vez que, para cada projeto, a busca pelas informações sobre as variáveis foi logo seguida do preenchimento do banco de dados relativo a esse projeto.

Além disso, também foram registradas informações relativas à data de publicação de todas as 195 notícias analisadas e ao número de notícias referentes a cada projeto.

3.9. Procedimento para a Análise dos Resultados

A análise da amostra de 86 projetos mapeados se deu em dois momentos distintos. Primeiramente, analisou-se os projetos com base em cada uma das cinco dimensões separadamente: dimensões características gerais, modelo de negócio, matéria-prima, tecnologia e produto. Em seguida, foram realizadas análises cruzando variáveis de diferentes dimensões a fim de se estabelecer algumas relações.

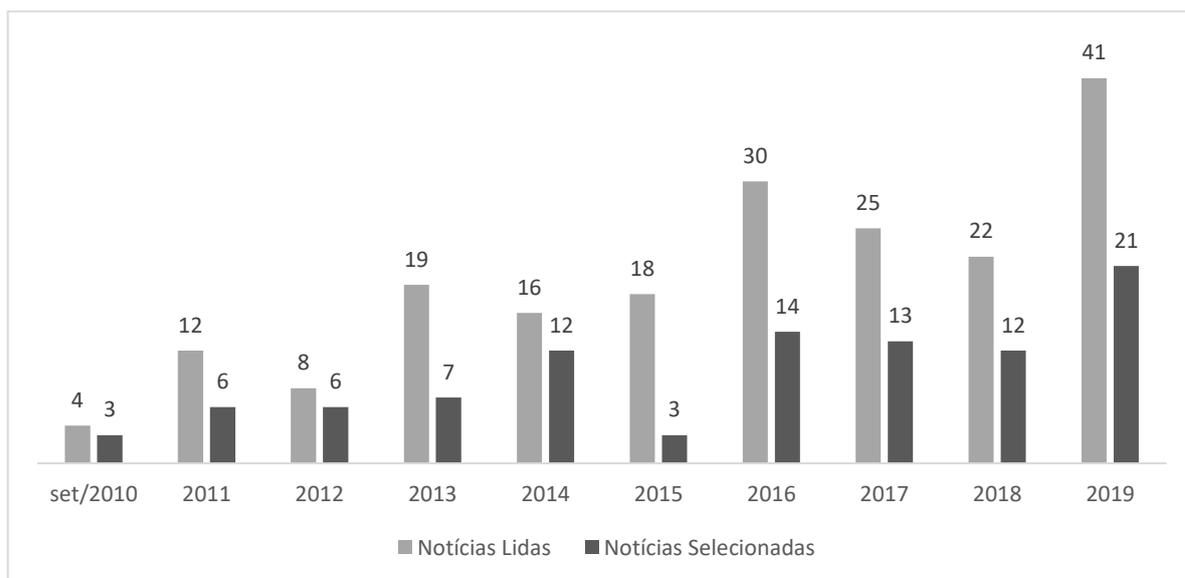
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A amostra de 86 projetos obtida através da metodologia descrita é analisada no presente capítulo com base nas dimensões características gerais, modelo de negócio, matéria-prima, tecnologia e produto. Em seguida são realizadas algumas análises cruzando variáveis de diferentes dimensões.

4.1. Publicação de Notícias Relacionadas ao CO₂

Conforme mencionado anteriormente, através da metodologia adotada neste trabalho foi obtido um conjunto inicial de 195 notícias, das quais 97 foram selecionadas por estarem relacionadas ao tema de utilização do dióxido de carbono. Na Figura 24 encontra-se a distribuição temporal dessas publicações relacionadas ao CO₂ considerando o período de interesse, de setembro de 2010 a dezembro de 2019.

Figura 24: Distribuição temporal das publicações relacionadas ao termo “dióxido de carbono” no período de setembro de 2010 a dezembro de 2019 no portal *Biofuels Digest*



Fonte: Elaborado pela autora

É possível perceber um crescimento significativo no número de notícias entre o início e o fim do período analisado. No entanto, esse aumento não foi linear, havendo períodos alternados de acréscimo e decréscimo na quantidade de publicações. Essa tendência também é observada quando se analisa apenas as notícias relacionadas ao tema de utilização de carbono.

Pela Figura 24, percebe-se que, no geral, as notícias relativas ao tema de interesse correspondem a cerca da metade do total de notícias encontradas para cada ano. Nos anos 2010, 2012, e 2014, entretanto, as publicações sobre a utilização de carbono corresponderam a 75% do total, ao passo que, no ano de 2015, elas corresponderam a apenas 17%.

Dentre as publicações que foram descartadas por não tratarem do tema de interesse, os assuntos mais recorrentes, ao longo de todo o período analisado, foram emissões de gás carbônico, iniciativas isoladas de captura de CO₂ e armazenamento de carbono.

Conforme já mencionado, a partir das 97 notícias selecionadas foi possível identificar 86 iniciativas de utilização de gás carbônico, haja vista que, em alguns casos, um mesmo projeto era abordado em mais de uma publicação. Na maioria dos casos, entretanto, isso não aconteceu: para 90% dos projetos foi encontrada apenas uma notícia correspondente; 8% dos projetos apresentaram duas notícias a respeito e apenas 2% dos projetos foram contemplados com três publicações a seu respeito.

4.2. Características Gerais

Para a dimensão de características gerais foram escolhidas duas variáveis de interesse: localização e status atual do projeto.

No que diz respeito à localização dos projetos, a informação foi facilmente obtida nas próprias publicações do portal *Biofuels Digest*. Os resultados estão disponíveis nas Figuras 25 e 26, as quais apresentam a distribuição de iniciativas por país e continente, respectivamente.

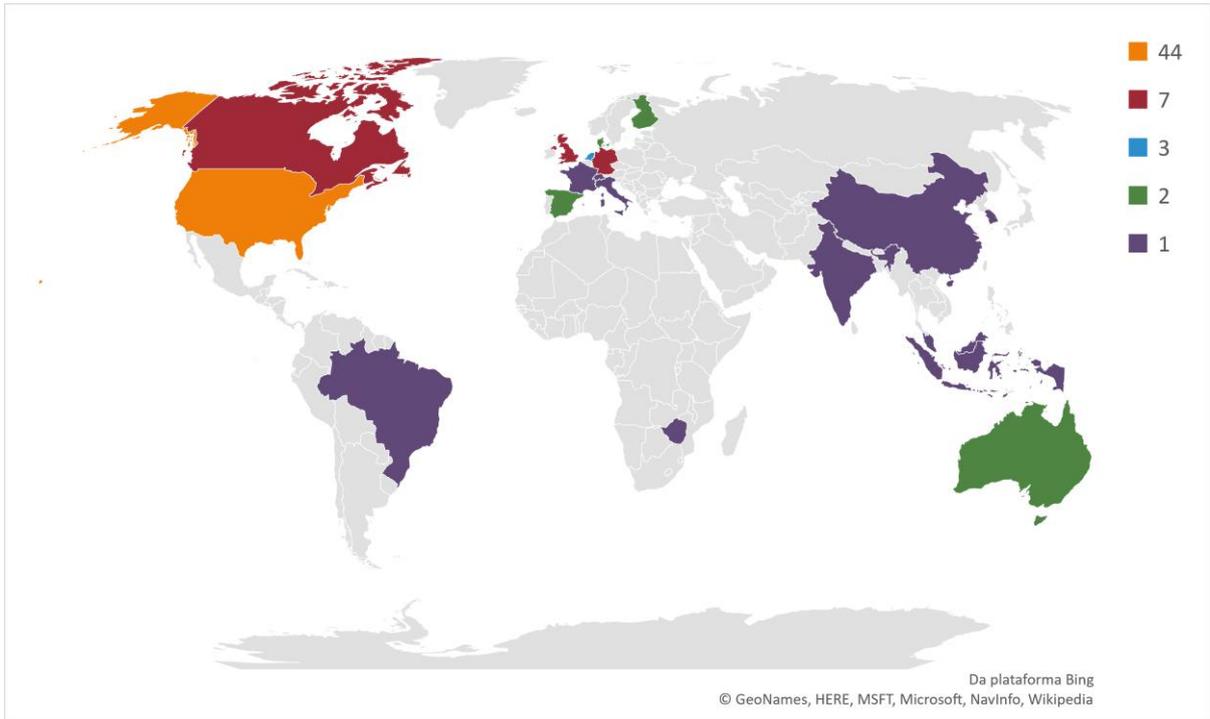
Foram identificados 44 projetos localizados nos Estados Unidos no período de interesse, o que corresponde a 51,2% da totalidade de projetos mapeados. O continente americano abrigou 60,5% das iniciativas, devido também à contribuição, em menor escala, do Canadá, com 7 projetos, e do Brasil, com 1 projeto. No caso brasileiro, o projeto era da empresa norte americana *Proterro* para a produção de açúcares a partir do CO₂.

O segundo continente com maior número de iniciativas de utilização de carbono foi a Europa, com 26 projetos distribuídos em nove países. A Alemanha e o Reino Unido foram responsáveis, sozinhos, por cerca de metade do total de projetos realizados no continente, contribuindo com 7 projetos cada, seguidos pela Holanda, com 3 projetos.

No continente asiático foram observados 5 projetos, localizados na China, Índia, Coreia do Sul, Malásia e Indonésia. Ambos os projetos na Oceania estavam localizados na Austrália, ao passo que o único projeto mapeado em solo africano era da empresa *Triangle Limited*, no Zimbábue, para o aproveitamento do CO₂ oriundo do processamento de etanol para a indústria de bebidas.

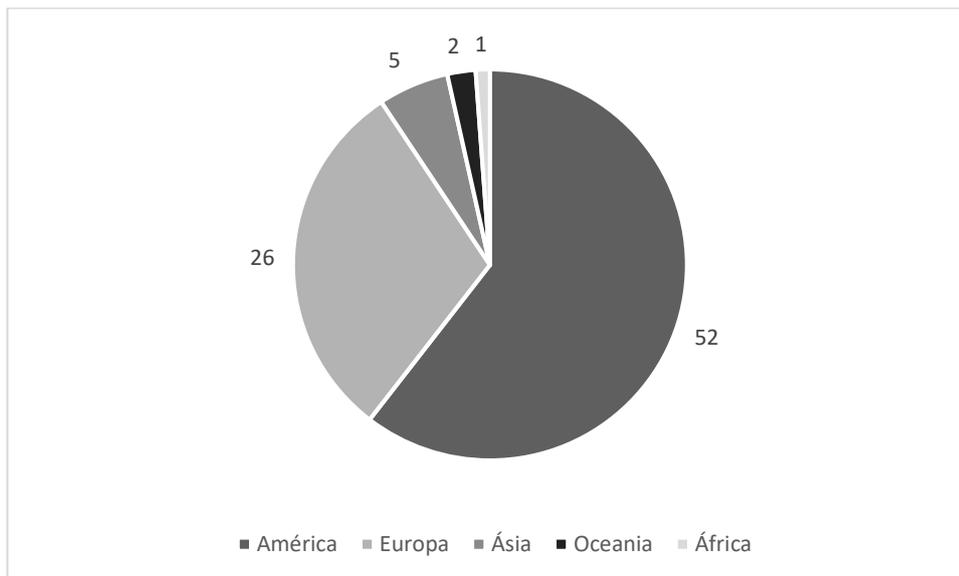
É possível perceber, portanto, que a localização dos projetos segue a lógica dos quatro *clusters* de grandes fontes de emissão (Estados Unidos, Noroeste Europeu, Sudeste Asiático e Sul da Ásia): as regiões de maiores volumes de emissões de gás carbônico são também onde se observam maiores quantidades de iniciativas para a sua utilização.

Figura 25: Distribuição geográfica por país das iniciativas mapeadas para a utilização de CO₂



Fonte: Elaborado pela autora

Figura 26: Distribuição geográfica por continente das iniciativas mapeadas para a utilização de CO₂



Fonte: Elaborado pela autora

No que diz respeito ao status, os projetos foram classificados em ativos, finalizados ou sem informações. Foram considerados ativos os projetos que possuíam informações recentes a seu respeito, ao passo que foram classificados como finalizados os projetos cuja data de finalização estava explícita ou projetos em que alguma empresa participante não se encontrava mais em operação. Esse foi o caso, por exemplo, de projetos envolvendo as empresas norte americanas *Joule Unlimited* e *Sapphire Energy*, as quais já encerraram suas operações. Já as iniciativas sem informações sobre seu status foram, em sua maioria, projetos realizados em universidades ou instituições de pesquisa, para os quais não foi possível encontrar informações recentes a seu respeito.

A distribuição dos projetos de acordo com seu status pode ser encontrada na Tabela 5.

Tabela 5: Status atual dos projetos de utilização de carbono

Status dos Projetos	
Ativo	23
Finalizado	6
Sem informações	57

Fonte: Elaborado pela autora

4.3. Modelo de Negócio

Na dimensão de modelo de negócio, as variáveis de interesse analisadas podem ser divididas em três subgrupos: liderança, parceria e financiamento. O objetivo era caracterizar os atores envolvidos nos projetos, identificar as relações existentes entre eles, e mapear as fontes de recursos para as iniciativas.

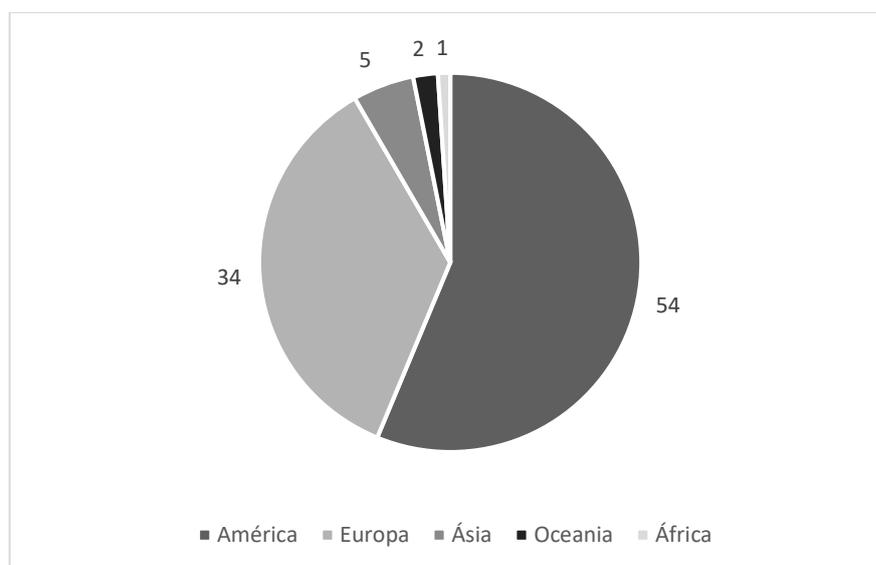
4.3.1. Organização Líder

Entende-se por organização líder aquela empenhada em estabelecer parcerias com outras organizações para estruturar seus negócios, aquela proprietária da maior parte dos negócios e/ou aquela apresentada como coordenadora do projeto (TARGUETA, 2019). A partir dos 86 projetos, foram identificadas 96 organizações líderes, haja vista que em 10 projetos não foi possível identificar um único líder e, nesses casos, foram consideradas as duas empresas envolvidas como líderes.

A partir da identificação da liderança de cada projeto, buscou-se caracterizar o seu perfil em termos de país de origem, setor de atuação e classificação, no caso de empresas, em estabelecida ou *startup*.

No que diz respeito ao país de origem, observa-se pela Figura 27 que a distribuição geográfica das empresas segue a tendência de localização dos projetos. Isso porque, em 88,4% das iniciativas, a localização do projeto correspondia ao país de origem da organização líder – ou de pelo menos uma das organizações líderes nos casos em que havia duas líderes.

Figura 27: Distribuição por continente das organizações identificadas como líderes dos projetos



Fonte: Elaborado pela autora

Em termos de países, 47 líderes, ou seja, quase metade do total, são oriundos dos Estados Unidos, 12 lideranças apresentam origem alemã, e tanto Reino Unido quanto Canadá possuem 7 organizações exercendo papel de liderança. Além disso, convém ressaltar que, enquanto no continente americano as organizações estão concentradas em apenas dois países, nos continentes europeu e asiático se observa uma maior distribuição das organizações: na Europa, os líderes são oriundos de 9 países distintos e, na Ásia, de 5.

As organizações identificadas podem ser divididas em quatro grupos: empresas, universidades, organizações de pesquisa, e projetos de pesquisa. Foram consideradas organizações de pesquisa instituições como o Laboratório Nacional de Energia Renovável (NREL, do inglês *National Renewable Energy Laboratory*), laboratório do Departamento de Energia dos Estados Unidos. Por sua vez, foram denominadas projetos de pesquisa as iniciativas que contaram com a participação de um grupo de atores sem que se conseguisse identificar um único líder. Um exemplo de projeto de pesquisa foi o projeto finlandês *SOLETAIR*, o qual reuniu empresas e centros de pesquisa universitários. A Tabela 6 apresenta a divisão da amostra de lideranças nos projetos considerando os quatro grupos.

Tabela 6: Composição da amostra de organizações líderes

Liderança nos Projetos	
Empresas	60
Universidades	28
Organizações de Pesquisa	5
Projetos de Pesquisa	3

Fonte: Elaborado pela autora

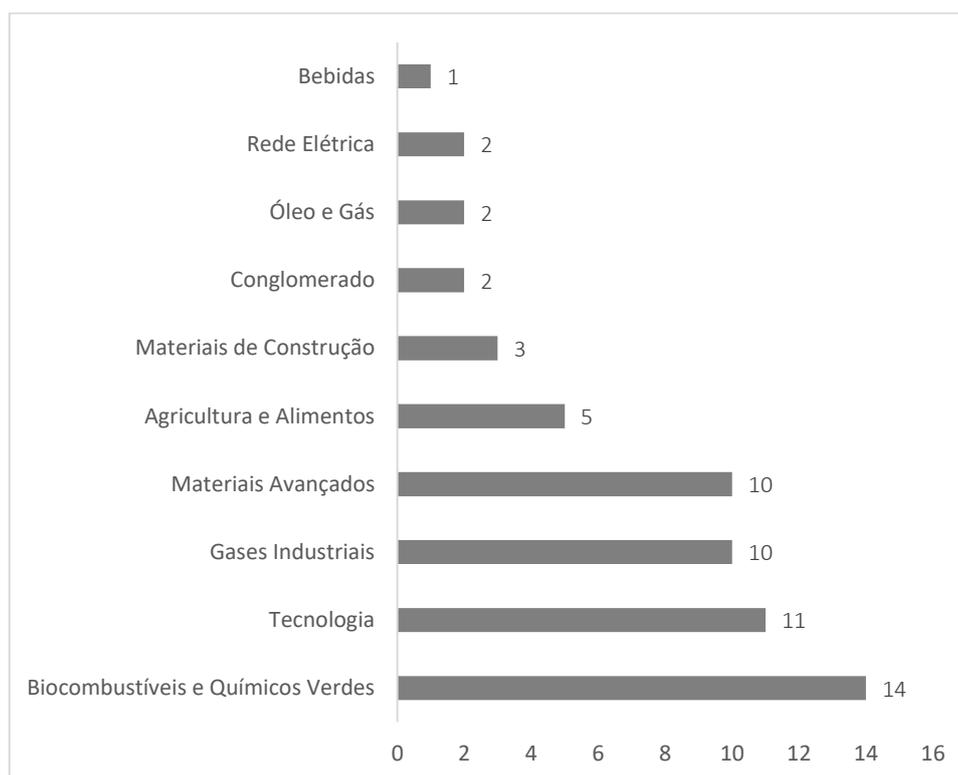
A partir das 60 lideranças classificadas como empresas, foi possível identificar 10 setores de atuação distintos, os quais encontram-se representados na Figura 28.

A classificação por setor foi realizada utilizando as plataformas *CrunchBase* e *i3* mencionadas na metodologia, as quais apresentam informações sobre o perfil de diferentes

empresas. Nelas, o termo “conglomerado” era utilizado para se referir às empresas atuantes em diferentes setores sem que haja um como predominante.

Percebe-se uma participação expressiva, em 75% dos projetos, dos setores de biocombustíveis e químicos verdes, tecnologia, gases industriais e/ou materiais avançados na liderança dos projetos. Além disso, percebe-se a participação de organizações líderes cujos setores de atividade industrial se configuram como grandes fontes estacionárias de emissão de gás carbônico: materiais de construção, óleo e gás, energia e biocombustíveis, além do setor de materiais avançados como representante da indústria petroquímica.

Figura 28: Setor de atuação das empresas identificadas como líderes dos projetos



Fonte: Elaborado pela autora

Denominam-se estabelecidas as empresas as quais estão posicionadas em tecnologias e mercados existentes no momento que uma nova tecnologia surge (HAMILTON, 1990). Por outro lado, empresas emergentes ou *startups* são aquelas empresas criadas para explorar uma

nova tecnologia (HAMILTON, 1990). Neste trabalho, foi utilizado o corte de oito anos como critério temporal para a classificação como *startup*, conforme apresentado por Homfeldt, Rese e Simon (2019). Desse modo, foram consideradas como *startups* as empresas criadas a partir de 2012 para explorar uma nova tecnologia. Na Tabela 7 encontra-se a classificação da amostra de empresas líderes em estabelecidas ou *startups*. Em alguns casos, não foi possível obter informações sobre a fundação das empresas, e elas foram agrupadas na categoria “sem informações”.

Tabela 7: Classificação das empresas identificadas como líderes dos projetos

Empresas Líderes	
Estabelecida	48
<i>Startups</i>	7
Sem informações	5

Fonte: Elaborado pela autora

Percebe-se, assim, a predominância de empresas estabelecidas como líderes dos projetos. Dentre as 7 *startups* em posição de liderança, 4 atuam no setor de materiais avançados e as 3 restantes atuam nos setores de biocombustíveis e químicos verdes, agricultura e alimentos, e tecnologia, respectivamente. No entanto, embora muitas não se encaixem mais na definição de *startup* adotada para este trabalho, 55% das empresas na liderança dos projetos foram fundadas a partir do ano 2000, ou seja, são empresas relativamente novas.

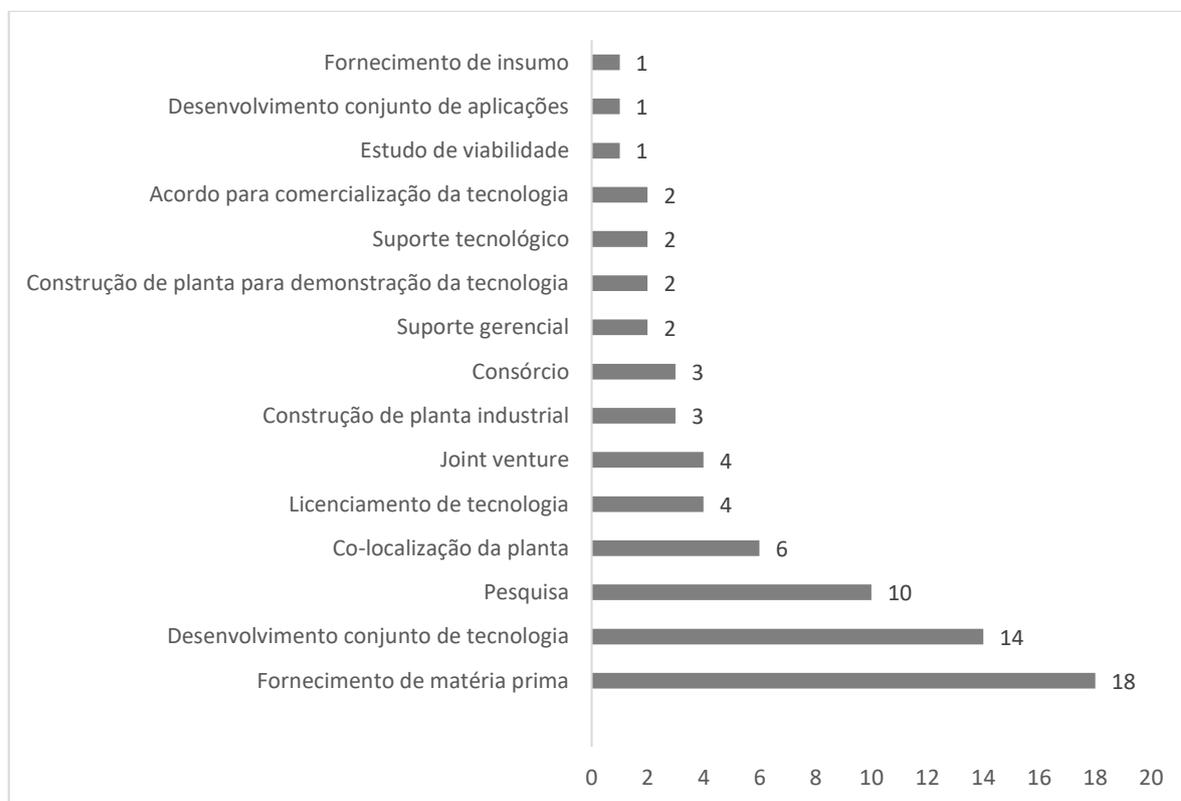
Um ponto importante a se ressaltar é que, na amostra de 96 lideranças analisada, foram considerados os casos em que uma mesma organização configurou como líder em mais de um projeto. Isso aconteceu com 10 organizações, dentre elas as empresas norte americanas *LanzaTech* e *Kiverdi*, e a empresa alemã *Covestro*, as quais apareceram, cada uma, em dois projetos. Já a empresa francesa *Air Liquide Industrial* exerceu papel de liderança em quatro projetos. Sendo assim, as 96 organizações líderes se resumem a 84 organizações distintas. No entanto, como o objetivo era analisar o perfil de liderança na amostra de projetos, as repetições

não foram desconsideradas e se trabalhou com a amostra de 96 líderes a fim de considerar o peso de participação de cada perfil de organização nas iniciativas mapeadas.

4.3.2. Parceria

No que diz respeito às parcerias, foram analisados tanto o tipo de parceria existente nos projetos quanto o número de organizações envolvidas. Dos 86 projetos mapeados, 30 projetos, ou seja, 34,9%, não apresentaram nenhuma relação de parceria; em 16 projetos foram identificados dois ou mais tipos de parceria e nos 40 projetos restantes apenas uma forma de parceria foi observada entre as organizações envolvidas em cada projeto. Desse modo, foram identificadas, no total, 73 casos de parcerias, distribuídos, de forma indutiva, em 16 categorias distintas (Figura 29).

Figura 29: Relações de parceria identificadas entre as organizações envolvidas nos projetos de utilização de CO₂



A relação de parceria mais identificada entre os projetos foi o fornecimento de matéria-prima, sendo que, em 17 dos 18 casos mapeados, a matéria-prima fornecida era apenas o CO₂. A exceção foi o projeto liderado pela Universidade de Tecnologia de *Lappeenranta*, na Finlândia, no qual havia o fornecimento não só de CO₂, mas também de H₂ pelas empresas finlandesas *Finnsementti* e *Kemira*, respectivamente. Em 11 dos 18 casos foi identificada a participação de uma empresa do setor de biocombustíveis, produtora de etanol, como fornecedora do gás carbônico. Já em termos da organização líder, em 8 projetos a liderança pertencia ao setor de gases industriais, sendo exercida pelas empresas *Air Liquide Industrial*, *Air Products*, *Airgas Carbonic*, *Airgas USA* e *Messer Group*.

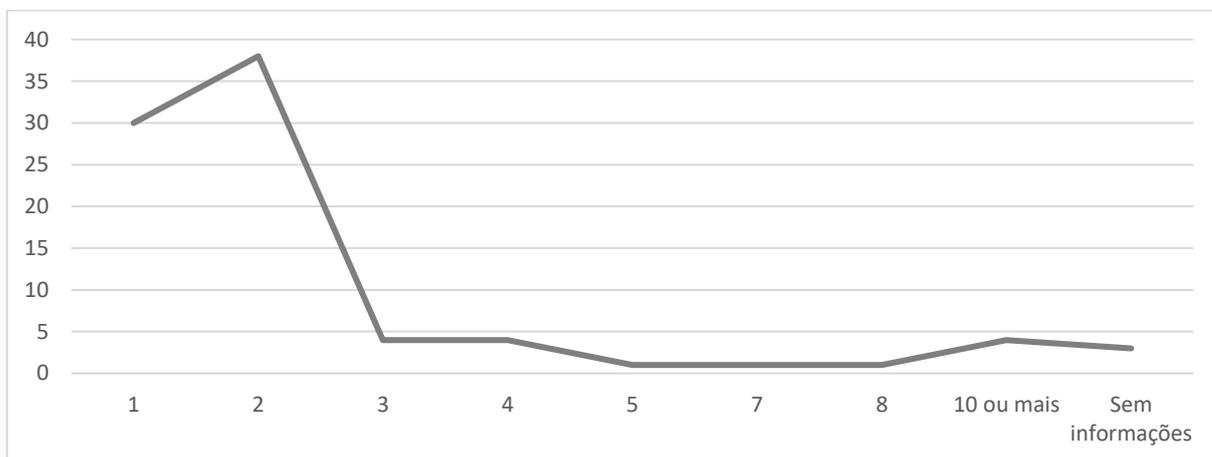
A segunda forma de parceria mais recorrente foi o desenvolvimento conjunto de tecnologias para o aproveitamento do dióxido de carbono como matéria-prima. Desse tipo de parceria participaram tanto universidades e organizações de pesquisa quanto empresas.

Todos os 6 casos de parceria de co-localização da planta se deram em conjunto com o fornecimento de matéria-prima: as instalações para aproveitamento do dióxido de carbono foram construídas adjacentes às instalações da organização fornecedora do CO₂. O único acordo de fornecimento de insumo também ocorreu conjuntamente com o fornecimento de gás carbônico: ficou acordado o fornecimento tanto de CO₂ quanto de calor residual resultantes do processamento de etanol pela empresa canadense *Greenfield Ethanol* para outra empresa canadense, a *Truly Green Farms*, do setor agrícola.

Em relação ao número de organizações envolvidas, o mais frequente, em 44,2% dos projetos mapeados, foi a participação de duas organizações. Em segundo lugar, com 34,9%, ficaram os projetos envolvendo uma única organização, sendo esta, em 56,7% dos casos, uma universidade e, em 10%, uma instituição de pesquisa. A distribuição do número de organizações

envolvidas por projeto encontra-se na Figura 30. Vale ressaltar que não foram consideradas como envolvidas nos projetos organizações responsáveis unicamente pelo financiamento.

Figura 30: Número de organizações envolvidas nos projetos de aproveitamento de CO2



Fonte: Elaborado pela autora

Foram observados 4 projetos com mais de 10 organizações envolvidas. Um deles foi o projeto espanhol *A-LEAF*, o qual reunia um total de 14 atores, dentre organizações de pesquisa, universidades europeias e empresas, em um consórcio. Foi identificado também o projeto *Carbon2Chem*, liderado pela *ThyssenKrupp*, que contou com parcerias com 17 organizações para desenvolvimento conjunto de tecnologia. O terceiro projeto foi conduzido pela *Cemvita Factory* com parcerias de pesquisa e suporte gerencial com mais de 16 atores dentre empresas e universidades. O quarto projeto, por sua vez, teve como líder a empresa de tecnologia *Opus 12* e a participação de diferentes organizações para desenvolvimento conjunto de tecnologia e suporte tecnológico.

Em 3 projetos, não foi possível identificar o número exato de atores participantes. Foram elas um estudo de viabilidade conduzido pela Universidade de Tecnologia de *Lappeenranta*, na Finlândia, um acordo para desenvolvimento conjunto de tecnologia liderado pela empresa

alemã *Covestro*, e o fornecimento de CO₂ pela empresa espanhola *Abengoa Bioenergia* para produtores agrícolas locais.

4.3.3. Financiamento

Por fim, no que diz respeito às fontes de recursos para o projeto, foram identificados alguma forma de financiamento em 34 projetos dentre os 86 mapeados. O Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE, do inglês *The United States Department of Energy*), teve participação em 11 projetos, sendo o principal financiador. Além disso, foram identificadas a participação de fundos europeus, como o fundo de investimento em economia circular da organização escocesa *Zero Waste Scotland*, e agências governamentais, como a *National Science Foundation* e a *California Energy Commission*, dos Estados Unidos, e a *Finnish Funding Agency for Technology and Innovation*, da Finlândia. Também se observou a participação de empresas privadas como patrocinadoras das iniciativas.

4.4. Matéria-prima

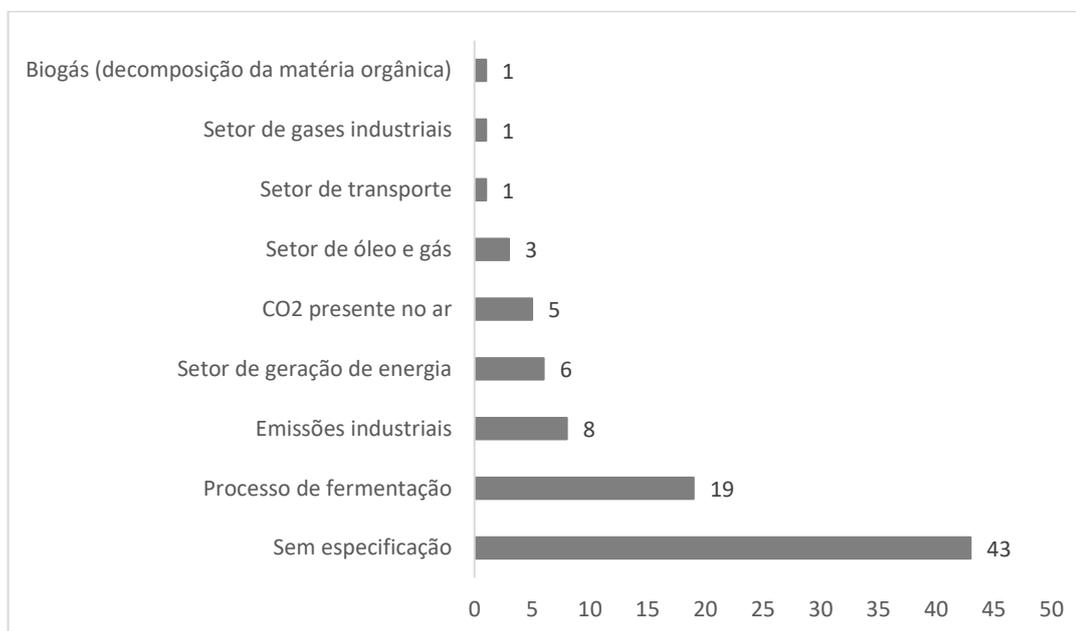
Na dimensão de matéria-prima procurou-se avaliar os projetos no que tange ao tipo e ao acesso à mesma a fim de mapear se os projetos apresentavam um foco para o aproveitamento de dióxido de carbono e/ou um fornecedor específico.

Apenas metade dos projetos identificados apresentaram, em seu escopo, especificação sobre o tipo de CO₂ a ser aproveitado. Esse baixo percentual pode ser explicado, em parte, pelos 26 projetos conduzidos por universidades, instituições e/ou projetos de pesquisa, os quais, por terem foco no processo em laboratório, não se preocuparam em definir uma procedência para o gás carbônico a ser utilizado. Vale ressaltar, entretanto, que esse padrão não foi observado

em todos os projetos envolvendo essas organizações: em 9 projetos foi especificada a fonte de CO₂ para o qual era voltada a iniciativa.

A Figura 31 apresenta as origens de CO₂ informadas pelos projetos, bem como o número de projetos voltados para cada um. Apenas uma iniciativa, conduzida pela *startup* americana *C2CNT*, apresentou interesse por duas fontes de gás carbônico: proveniente diretamente do ar e de emissões industriais.

Figura 31: Fontes de CO₂ visados como matéria-prima para os projetos



Fonte: Elaborado pela autora

É possível perceber que, no geral, as iniciativas as quais definiram o tipo de CO₂ a ser utilizado estavam voltadas para o CO₂ proveniente de atividades industriais responsáveis pela emissão de grandes volumes do gás para a atmosfera, como a geração de energia, processamento de óleo e gás e o setor de biocombustíveis. Além disso, dentre as 8 iniciativas voltadas para o CO₂ oriundo de emissões industriais, 3 estavam voltadas para o processo de produção de cimento e duas para a produção de aço, sendo que tanto a indústria do aço quanto a produção de cimento também fazem parte do grupo grandes fontes estacionárias de emissão.

O setor de transporte, responsável por 25% das emissões de gás carbônico em 2017 (IEA, 2019), também foi contemplado em um projeto.

Apenas um projeto apresentou, como fonte de CO₂, o setor de gases industriais: nesse caso, o gás carbônico fornecido não era um resíduo ou subproduto do processo, mas sim o próprio produto. Nessa iniciativa, liderada pela empresa alemã *Linde AG* e a norte americana *Sapphire Energy*, a *Linde*, do setor de gases industriais, era a fornecedora de CO₂ para o desenvolvimento da tecnologia por parte da outra empresa.

No que diz respeito ao acesso à matéria-prima, 41,9% projetos apresentaram um fornecedor definido de dióxido de carbono, incluindo aqueles que utilizam o gás carbônico proveniente diretamente do ar. Em quase metade desses projetos, o fornecimento de CO₂ se dava por meio de acordo de parceria entre as organizações envolvidas.

Em alguns casos, o escopo definia o tipo de CO₂ a ser utilizado, mas não havia informação sobre fornecedor específico, o que justifica o percentual de projetos com acesso à matéria-prima definido ser menor que o de projetos que escolheram uma fonte de CO₂ como foco.

4.5. Tecnologia

Na dimensão de tecnologia, as variáveis de interesse analisadas podem ser divididas em quatro subgrupos: aspectos tecnológicos, energia, configuração e escala. O objetivo era mapear os tipos de captura de CO₂, as rotas de conversão e as fontes de energia adotadas. Além disso, procurou-se avaliar a configuração do projeto no que diz respeito à existência ou não de integração como biorrefinaria e/ou com o armazenamento de carbono, além do grau de maturidade da iniciativa.

4.5.1. Aspectos Tecnológicos

De todos os 86 projetos identificados, apenas em 4 havia informações sobre a tecnologia de captura do CO₂. Foram eles: o projeto conduzido pela Escola Politécnica Federal de Lausanne, na Suíça, o qual utilizava um sistema TSA (do inglês, *Temperature Swing Adsorption*); o projeto da Universidade do Colorado, nos Estados Unidos, que contava com um sistema de captura baseado em microorganismos sensíveis à luz; um projeto finlandês *SOLETAIR*, que fazia uso de uma unidade de captura direta de CO₂ do ar baseada em adsorção em sorventes sólidos a base de aminas; e o projeto liderado pela empresa canadense St Marys Cement, a qual utilizava um sistema de absorção de CO₂. Nos demais projetos, nenhuma informação foi divulgada a respeito do mecanismo de captura do carbono. Por esse motivo, pode-se concluir que a tecnologia de captura não parece ser foco de atenção nos projetos de aproveitamento do dióxido de carbono como matéria-prima.

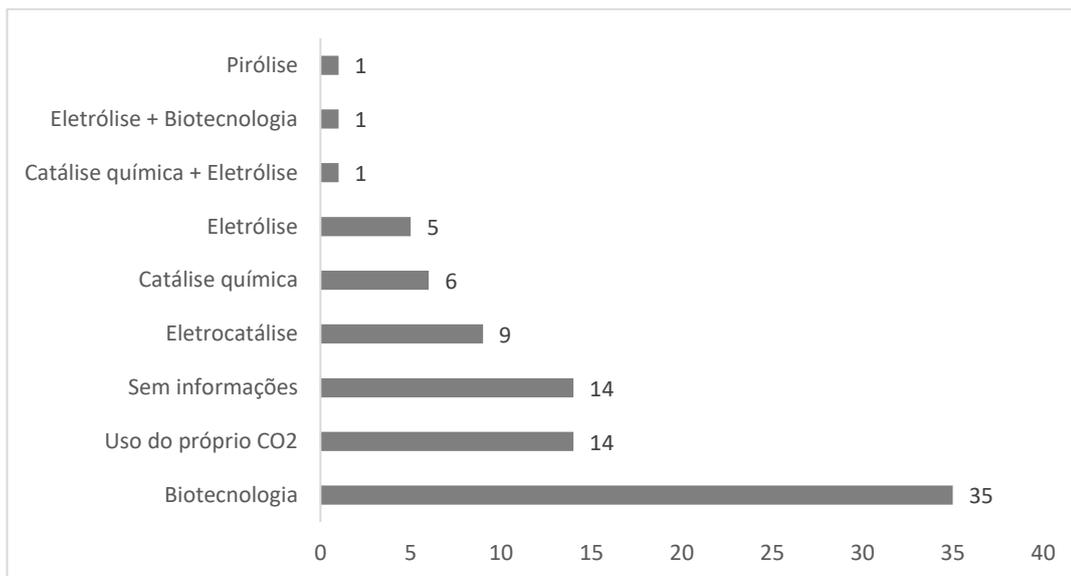
No que diz respeito à rota de conversão, foram identificadas 8 rotas diferentes, sendo a mais recorrente a biotecnológica, em 40,7% dos projetos. Foram observados 14 projetos nos quais o próprio CO₂ é o produto de interesse, submetido apenas aos procedimentos de liquefação e/ou purificação antes de ser utilizado. Em todos esses 14 projetos estava envolvida pelo menos uma empresa dos setores de gases industriais, biocombustíveis ou do setor agrícola.

As rotas de conversão adotadas pelos projetos estão representadas na Figura 32. De uma maneira geral, observou-se uma presença significativa de rotas tecnológicas tradicionais, como catálise e eletrólise, nas iniciativas de utilização de carbono. Ainda assim, a biotecnologia, rota mais inovadora, se mostrou como a mais recorrente dentre a amostra de projetos mapeados.

Conforme discutido no capítulo 2, a molécula de CO₂ é uma forma altamente estável do carbono, sendo necessária, portanto, uma grande quantidade de energia para convertê-la em

outros produtos (AMPELLI; PERATHONER; CENTI, 2015). Assim, a escolha pela biotecnologia como rota de conversão pode ser associada a uma solução para o desafio da demanda energética, uma vez que essas rotas não são intensivas em consumo de energia para a conversão do CO₂.

Figura 32: Rotas tecnológicas identificadas nos projetos para a conversão de CO₂



Fonte: Elaborado pela autora

4.5.2. Energia

Passando para a análise da variável energia, observou-se que em 79,1% dos projetos não foi informada qual a fonte utilizada. Assim como a tecnologia de captura de carbono, pode-se concluir que a fonte de energia não leva tanto destaque nas publicações a respeito do aproveitamento do gás carbônico como matéria-prima. Ainda assim, nos casos em que a fonte de energia foi mencionada no escopo das iniciativas, foi possível ratificar a tendência de utilização de fontes renováveis de energia nos processos de CCU, conforme discutido por Bruhn, Naims e Olfe-Kräutlein (2016): dos 18 projetos, 17 estavam pautados da utilização de energia de fontes renováveis, como solar, eólica e hidrogênio. No projeto restante, já discutido

anteriormente, havia um acordo de parceria para o fornecimento de calor residual do processamento de etanol.

4.5.3. Configuração

Em termos da configuração dos projetos, o objetivo foi verificar a existência ou não de integração como biorrefinaria e/ou com armazenagem de carbono.

Segundo Schieb *et al* (2015), a biorrefinaria consiste uma entidade industrial na qual diferentes tipos de empresas são reunidos em um mesmo local, formando um ecossistema industrial em que produtos intermediários, energia e serviços são fornecidos de uma empresa para a outra. Essa configuração apresenta vantagens competitivas para as organizações participantes, proporcionadas pelas economias de escala e diversidade de produtos facilitadas pela proximidade geográfica.

Apesar das vantagens oferecidas por essa configuração, ela foi mencionada no escopo de apenas 2 projetos: a iniciativa conduzida pela empresa norte americana *Aemetis* para a construção de uma instalação de liquefação de CO₂ na já existente biorrefinaria de Keyes, na Califórnia; e o projeto piloto *Algal Carbon Conversion*, no Canadá, cujo objetivo era a construção de uma biorrefinaria baseada no uso da biomassa de algas, cultivada com uso do gás carbônico, para a obtenção de produtos diversos. Assim, de uma maneira geral, foi possível concluir que os projetos de utilização de CO₂ focam em soluções isoladas em detrimento à integração de soluções.

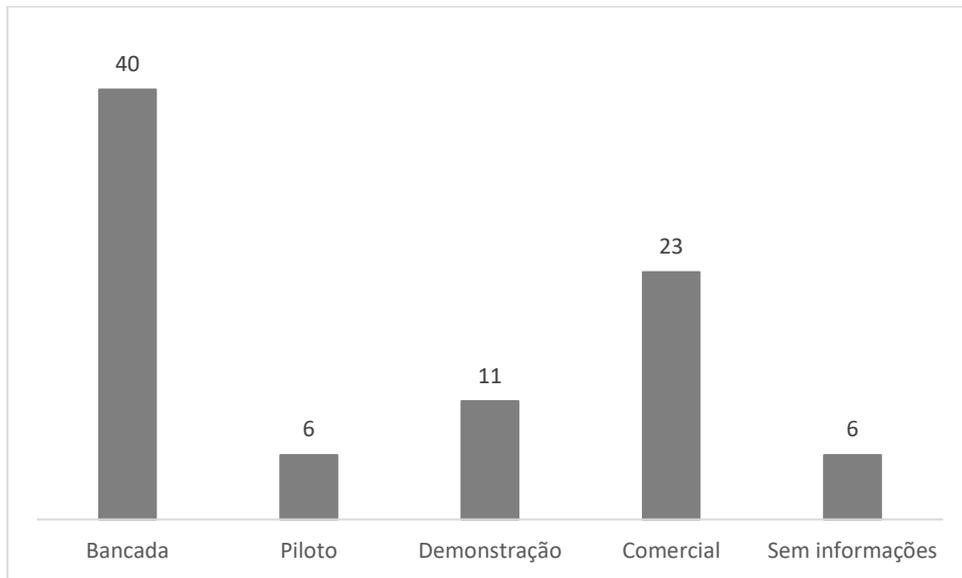
Conforme discutido anteriormente, existe a possibilidade de se combinar a armazenagem com a utilização de dióxido de carbono, no conceito denominado CCUS. Nesse caso, parte do CO₂ capturado é utilizado como matéria-prima na obtenção de novos produtos

ao passo que o restante é destinado à armazenagem (DOE, 2019). Dentre os projetos mapeados, apenas 3 apresentaram o conceito de CCUS. No caso dos projetos conduzidos pela organização de pesquisa australiana *CO2CRC* e pela empresa britânica *Drax Group*, os objetivos eram semelhantes: explorar, tanto por captura e armazenagem quanto por utilização, formas de reduzir as emissões de CO₂ na produção de aço nas instalações da empresa *BlueScope Steel* e na estação de geração de energia *Drax Power Station*, respectivamente. O terceiro projeto, liderado pela empresa alemã *Messer Group*, tinha como objetivo a construção de uma instalação de purificação, liquefação e armazenamento do CO₂ oriundo do processamento de etanol, pela empresa espanhola *Abengoa Bioenergia*, a ser utilizado para diversas aplicações.

4.5.4. Escala

Por fim, a análise da escala em que se encontravam os projetos visava a identificar o grau de maturidade de cada iniciativa. Para os projetos finalizados ou cujo status atual se desconhecia, foi considerado como estágio de maturidade a última informação encontrada a seu respeito. Os projetos sem informação quanto à escala foram aqueles em que se anunciou a intenção ou início da iniciativa, mas não foram encontradas informações sobre o andamento dos mesmos. Os resultados encontram-se na Figura 33.

Figura 33: Grau de maturidade dos projetos de utilização de CO₂



Fonte: Elaborado pela autora

Foi percebida a predominância de projetos ainda em escala de bancada, ou seja, de baixo grau de maturidade. Dentre os 40 projetos nessa situação, 26 foram conduzidos apenas por universidades, ou seja, sem a existência de parcerias com outros tipos de organização. Portanto, pode-se concluir que projetos envolvendo universidades tendem a se encontrar em estágio mais inicial quando não se observa a parceria com empresas.

De uma maneira geral, dentre os projetos cujo grau de maturidade era conhecido, 57,5% se encontrava em nível bancada ou piloto, o que sugere que o uso de dióxido de carbono como matéria-prima ainda se encontra em um estágio inicial de desenvolvimento. Essa é, possivelmente, uma explicação para o fato de a captura de carbono não receber muito destaque nos projetos identificados: nos estágios iniciais, os esforços podem estar mais voltados para o desenvolvimento da tecnologia em si, sendo o processo de captura, talvez, uma preocupação para etapas posteriores.

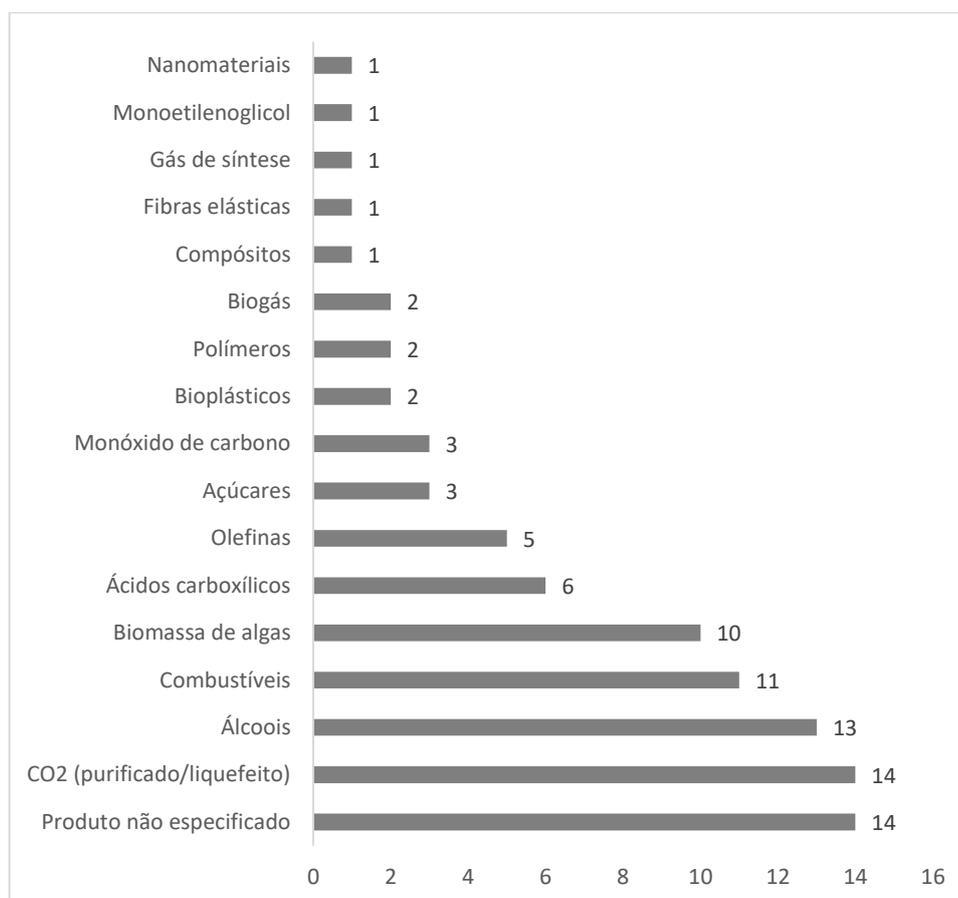
4.6. Produto

A dimensão de produto procurou caracterizar os produtos obtidos a partir do dióxido de carbono, identificando suas possíveis aplicações e classificando-os de acordo com sua natureza.

Uma vez realizado o levantamento dos produtos de interesse das iniciativas de aproveitamento de CO₂, foi possível agrupá-los em 16 categorias. Como alguns projetos apresentavam como objetivo a utilização do CO₂ sem submetê-lo a transformações químicas, uma das categorias de produto corresponde ao próprio CO₂, após etapa de purificação e/ou liquefação. Observaram-se, também, projetos sem especificação de produto alvo, nos quais se listavam, de forma genérica, as diversas possibilidades para os produtos. Nestes casos, o projeto apresentava, em geral, baixo grau de maturidade.

A Figura 34 apresenta os produtos identificados já agrupados em suas respectivas categorias. Vale ressaltar que esse agrupamento foi feito de forma indutiva, após a coleta de informações sobre os projetos. A categoria “combustíveis” foi criada para os casos em que não se especificou, no escopo no projeto, qual tipo de molécula era obtida.

Figura 34: Produto alvo dos projetos de aproveitamento de CO₂



Fonte: Elaborado pela autora

Percebeu-se que, nos casos em que o produto alvo já estava determinado, a categoria com maior representatividade entre os projetos foi a utilização do próprio CO₂ sem submetê-lo a qualquer tipo de transformação química. Também muito frequentes foram as iniciativas visando à obtenção de álcoois, sobretudo o etanol, e combustíveis no geral. Ademais, foi significativa a quantidade de projetos voltados para a utilização de CO₂ para a obtenção de biomassa de algas.

De uma maneira geral, ratificou-se a tendência de baixa diversificação do portfólio de produto obtidos a partir do dióxido de carbono. Na maioria dos projetos analisados não se identificou interesse, por parte das organizações envolvidas, pela utilização do CO₂ para a obtenção de produtos de caráter inovador. As iniciativas mais inovadoras, em termos de

produto, foram: o projeto da *startup* norte americana *C2CNT* para a obtenção de nanotubos de carbono (CNT, do inglês *carbon nanotubes*); a produção de poliuretano termoplástico (TPU, do inglês *thermoplastic polyurethane*) e de fibras elásticas a partir do TPU, ambos projetos conduzidos pela *Covestro*; a produção de polímeros biodegradáveis polihidroxicanoatos (PHA, do inglês *polyhydroxyalkanoates*) e policarbonatos nos projetos conduzidos, respectivamente, pela empresa italiana *Bio-on* e pela Universidade de Bath, no Reino Unido. Também convém destacar o caráter inovador dos projetos voltados para a obtenção de biomassa de algas, a qual pode ser processada para a obtenção de produtos variados.

Uma vez agrupados os produtos nas categorias definidas, foi feito um levantamento de possíveis aplicações para cada uma, representado na Tabela 8. Apesar das várias categorias identificadas na amostra de projetos, é possível perceber que, quando se analisam as aplicações, há uma convergência significativa dos produtos para o mercado de combustível.

Tabela 8: Aplicações dos produtos obtidos a partir de CO₂

Produto Alvo	Aplicações
Combustíveis	Substituto para combustível fóssil
Álcoois	Substituto para combustível fóssil, aditivo para combustível, intermediário para a obtenção de polímeros, resinas
Nanomateriais	Substituto para metais de baixa densidade, aplicações em nanoeletrônicos, componentes em compósitos de carbono
Ácidos carboxílicos	Intermediário para a obtenção de combustíveis, polímeros, plásticos, fármacos
CO ₂	Aplicação como refrigerante, no setor de alimentos e bebidas, insumo para o crescimento de biomassa de algas
Fibras elásticas	Substituto para fibras elásticas convencionais de origem fóssil
Bioplásticos	Setor automotivo, construção civil, eletrônicos, instrumentos médicos
Biomassa de algas	Intermediário para a obtenção de fármacos, biocombustíveis, bioplásticos
Açúcares	Intermediário para a obtenção de biocombustíveis e bioplásticos
Monóxido de carbono	Intermediário para a obtenção de aldeídos, álcoois, ácidos carboxílicos e combustíveis

Polímeros	Agricultura, construção civil, materiais avançados (adesivos, dispersantes, espumas, fibras e resinas), plásticos, laminação, materiais de isolamento, setor automotivo
Olefinas	Intermediário para a obtenção de polímeros
Biogás	Aplicação para geração de energia
Gás de síntese	Substituto para o combustível fóssil, geração de energia e matéria-prima para a indústria química
Compósitos	Construção civil
Monoetilenoglicol	Aplicação como anticongelante, intermediário para a obtenção de fibras, resinas

Fonte: Elaborado pela autora a partir dos dados obtidos de sites especializados

A classificação dos produtos também foi feita a partir das categorias definidas e levou em consideração dois aspectos: a “dropinidade” e a relação escala/valor agregado.

A “dropinidade” leva em consideração a estrutura química do produto obtido por fontes renováveis e suas aplicações. Um produto *drop-in* é aquele, obtido a partir de recursos renováveis, que já possui um equivalente, por exemplo de origem fóssil, em estrutura ou em propriedades e aplicações; ele é, portanto, um produto de substituição direta e/ou funcional. Quando se trata de um produto novo ou um produto já existente, porém destinado a novas aplicações, ele é classificado como não *drop-in* (DOE, 2018).

No caso de um produto *drop-in*, o principal desafio para a sua utilização gira em torno da sua competitividade frente à alternativa fóssil em termos de custo. Por outro lado, quando se trata de um produto não *drop-in*, existem desafios relacionados ao desenvolvimento de aplicações para aquele produto bem como a adaptação ou mesmo criação de infraestrutura para aproveitá-lo. Neste trabalho, a classificação quanto à “dropinidade” abrangeu tanto a estrutura química quanto as aplicações.

Já a classificação em *commodity* ou especialidade leva em consideração o volume de produção, o valor agregado e seu grau de diferenciação. São considerados *commodities* os produtos que são comercializados em grandes volumes, a um baixo valor unitário e sem

diferenciação. As especialidades, por sua vez, são comercializadas em menores volumes, apresentam maior valor unitário e são diferenciados pela sua performance. Para as *commodities* o fator decisivo é o preço, ao passo que para as especialidades é o desempenho.

A classificação dos produtos foi feita considerando os produtos caso a caso, e os resultados obtidos para a classificação em relação aos dois aspectos discutidos se encontra na Tabela 9. Vale ressaltar que, para essa análise, foram desconsiderados os produtos não especificados, haja vista a impossibilidade de classificá-los.

Tabela 9: Classificação dos produtos de acordo com a sua natureza

Classificação do Produto	%
Dropinidade	
<i>drop-in</i>	80,8%
não <i>drop-in</i>	19,2%
Valor Agregado	
<i>commodity</i>	79,5%
especialidade	20,5%

Fonte: Elaborado pela autora

Observa-se, na amostra analisada, a predominância de produtos classificados como *drop-in* e *commodities*. A predominância de produtos *drop-in* aponta para um movimento de substituição de produtos de origem fóssil por produtos obtidos a partir de fontes renováveis (TARGUETA, 2019). A vantagem é que esses produtos já possuem aplicação e infraestrutura para a sua utilização; no entanto, essa tendência evidencia a pouca iniciativa, até o momento, no que diz respeito à diversificação do portfólio de produtos obtidos a partir do dióxido de carbono.

A predominância de *commodities*, por sua vez, indica que a competição com os produtos oriundos de fontes fósseis está centrada no fator custo e não na diferenciação (TARGUETA,

2019). Isso implica que, até o momento, não foram observados esforços muito significativos voltados para o desenvolvimento de novas aplicações para os produtos obtidos a partir do dióxido de carbono.

4.7. Análises Cruzadas

Uma vez analisada a amostra de projetos em termos de cada dimensão separadamente, foram realizadas algumas análises cruzadas a fim de estabelecer relações entre variáveis de diferentes dimensões. Nessas análises, foram considerados apenas os projetos com informações disponíveis sobre as variáveis utilizadas: rota de conversão, produto obtido e grau de maturidade.

4.7.1. Relação entre os setores das organizações líderes e as rotas de conversão

A fim de entender a relação entre os setores de atuação das organizações líderes dos projetos e as rotas de conversão adotadas nos mesmos, analisaram-se quantitativa e qualitativamente quais as rotas empregadas por cada setor em seus projetos. A partir das informações obtidas, foi construída a Tabela 10.

Tabela 10: Setores das organizações líderes e as rotas de conversão adotadas em seus projetos

Setor	Rota	Total
Agricultura e Alimentos	Biotechnology, uso do próprio CO ₂	2
Materiais Avançados	Biotechnology, catálise química, catálise química + eletrólise, eletrólise, eletrólise + biotechnology	5
Biocombustíveis e Químicos Verdes	Biotechnology, uso do próprio CO ₂	2
Tecnologia	Biotechnology, eletrocatalise, eletrólise, uso do próprio CO ₂	4
Rede Elétrica	Biotechnology	1
Gases Industriais	Biotechnology, uso do próprio CO ₂	2
Conglomerado	Catálise química, eletrólise + biotechnology	2

Óleo e Gás	Biotecnologia	1
Materiais de Construção	Biotecnologia	1
Bebidas	Eletrocatalise	1
Projeto de Pesquisa	Biotecnologia, eletrocatalise, eletrólise	3
Organização de Pesquisa	Biotecnologia, catalise química, eletrólise	3
Universidade	Biotecnologia, catalise química, eletrocatalise, eletrólise, pirólise	5

Fonte: Elaborado pela autora

Ao se cruzarem as informações relativas aos setores das empresas líderes de cada projeto e às rotas de conversão adotadas, percebeu-se que a rota biotecnológica para aproveitamento de CO₂ se fez presente em projetos de praticamente todos os setores identificados, com exceção do conglomerado e do setor de bebidas. Os principais setores a utilizar essa rota foram o setor de biocombustíveis e químicos verdes, seguidos pelo setor de materiais avançados. Já as rotas menos frequentemente empregadas foram a pirólise e a combinação de catalise química seguida de eletrólise.

Por outro lado, quando se analisou as rotas de conversão adotadas por empresas de um mesmo setor, foram observados alguns setores explorando rotas variadas em seus projetos, ao passo que em outros setores as iniciativas se concentraram apenas em uma ou duas rotas. O setor de materiais avançados, por exemplo, desenvolveu projetos utilizando 5 das 9 rotas identificadas, enquanto o setor de tecnologia fez uso de 4 tecnologias de conversão. Por outro lado, o setor de óleo e gás liderou projetos aproveitando exclusivamente a biotecnologia, e o setor de gases industriais, em 9 de seus 10 projetos, conduziu iniciativas focadas no aproveitamento do próprio CO₂, sem submetê-lo a transformações químicas.

A presença expressiva do setor de gases industriais aponta para um fenômeno interessante. Essas empresas vêm configurando entre as iniciativas de aproveitamento de CO₂, porém, ao se analisar o escopo dos projetos, percebe-se que elas seguem exercendo as mesmas

atividades que já exerciam, ou seja, atividades relativas ao seu setor de origem. Desse modo, pode-se dizer que elas apenas diversificaram as fontes de CO₂, mas não a sua atividade em si.

No que diz respeito às universidades, por sua vez, observou-se a exploração de diferentes possibilidades tecnológicas, sendo a mais recorrente a biotecnologia.

4.7.2. Relação entre os setores das organizações líderes e os produtos obtidos

Para entender a relação entre os setores de atuação das organizações líderes dos projetos e os produtos obtidos nos mesmos, foi realizada uma análise quantitativa e qualitativa sobre os produtos de interesse nos projetos conduzidos por cada setor. A partir das informações obtidas, foi construída a Tabela 11.

Tabela 11: Setores das organizações líderes e os produtos obtidos em seus projetos

Setor	Produto	Total
Agricultura e Alimentos	CO ₂	1
Materiais Avançados	Ácidos carboxílicos, álcoois, biogás, fibras elásticas, nanomateriais, olefinas e polímeros	7
Biocombustíveis e Químicos Verdes	Ácidos carboxílicos, açúcares, álcoois, biomassa de algas, CO ₂ , combustíveis, olefinas	7
Tecnologia	Biomassa de algas, biogás, CO ₂ , gás de síntese, monoetilenoglicol, monóxido de carbono, olefinas	7
Rede Elétrica	Biomassa de algas	1
Gases Industriais	CO ₂ , combustíveis	2
Conglomerado	Produto não especificado	-
Óleo e Gás	Ácidos carboxílicos, álcoois	2
Materiais de Construção	Biomassa de algas, combustíveis, compósitos	3
Bebidas	Monoetilenoglicol	1
Projeto de Pesquisa	Biomassa de algas, combustíveis	2
Organização de Pesquisa	Álcoois, combustíveis, olefinas	3
Universidade	Ácidos carboxílicos, açúcares, álcoois, biomassa de algas, bioplástico, combustíveis, monóxido de carbono, olefinas	8

Fonte: Elaborado pela autora

Ao se cruzarem as informações relativas aos setores das empresas líderes de cada projeto e às categorias de produtos obtidos, percebeu-se que a maioria dos setores focaram na obtenção de produtos de no máximo 3 categorias diferentes. As exceções foram os setores de materiais avançados, biocombustíveis e químicos verdes, e tecnologia, nos quais foi possível observar maior diversificação do portfólio de produtos.

Por outro lado, a biomassa de algas e os combustíveis foram as categorias de produtos as quais foram exploradas por uma maior variedade de setores, seguidas dos álcoois e das olefinas. Por outro lado, 6 das 16 categorias de produtos identificadas foram exploradas, cada uma, por apenas um setor de empresa.

Assim como o observado nas rotas de conversão, as universidades foram as organizações que apresentaram maior diversificação de produtos explorados em seus projetos.

4.7.3. Relação entre os produtos obtidos e as rotas de conversão

Para entender a relação entre os produtos de interesse dos projetos e as rotas de conversão adotadas nos mesmos, foi realizada uma análise quantitativa e qualitativa sobre as rotas utilizadas nos projetos para obter cada produto. A partir das informações obtidas, foi construída a Tabela 12.

Tabela 12: Produtos de interesse e rotas de conversão adotadas para a sua obtenção

Produto	Rota	Total
Ácidos carboxílicos	Biotechnology, eletrocatalise	2
Álcoois	Biotechnology, catalise química, catalise química + eletrólise, eletrocatalise, eletrólise	5
Açúcares	Biotechnology	1
Olefinas	Biotechnology, catalise química, eletrocatalise, eletrólise	4
Algas	Biotechnology	1
Biogás	Biotechnology, eletrólise	2

Bioplásticos	Sem informações	-
CO ₂	Uso do próprio CO ₂	1
Combustíveis	Biotecnologia, catálise química, eletrocatalise, eletrólise	4
Compósitos	Sem informações	-
Fibras elásticas	Catálise química	1
Gás de síntese	Sem informações	-
Monoetilenoglicol	Eletrocatalise	1
Monóxido de carbono	Biotecnologia, catálise química, eletrólise	3
Nanomateriais	Eletrólise	1
Polímeros	Biotecnologia	1

Fonte: Elaborado pela autora

Ao se cruzarem as informações relativas às categorias de produtos obtidos e às rotas de conversão empregadas, foi possível perceber que a rota biotecnológica foi explorada em pelo menos um projeto para a obtenção de 9 das 16 categorias de produtos identificadas. Os projetos voltados para a produção de biomassa de algas foram os que mais fizeram uso da biotecnologia, seguidos das iniciativas para produção de combustíveis.

Por outro lado, os álcoois, os combustíveis e as olefinas foram as categorias de produtos nas quais se observou maior variedade de possibilidades tecnológicas exploradas.

4.7.4. Relação entre os produtos obtidos e o grau de maturidade

Para entender a relação entre os produtos de interesse e o grau de maturidade de seus respectivos projetos, foi construída a Tabela 13.

Tabela 13: Produtos de interesse e grau de maturidade de seus respectivos projetos

Produto	Bancada	Piloto	Demonstração	Comercial
Ácidos carboxílicos	5		1	
Açúcares	1	1		
Álcoois	10		2	1
Biomassa de algas	2	1	5	2
Biogás	1			1

Bioplásticos	2		
CO ₂ (purificado/liqufeito)			14
Combustíveis	7	1	3
Compósitos			1
Fibras elásticas	1		
Gás de síntese		1	
Monóxido de carbono	3		
Nanomateriais		1	
Olefinas	5		
Polímeros		1	1

Fonte: Elaborado pela autora

Ao se cruzarem as informações relativas às categorias de produtos obtidos e ao grau de maturidade de cada projeto, observou-se a predominância de projetos em nível de bancada em grande parte das categorias de produto identificadas. Dentre as exceções foram as iniciativas voltadas para o uso do próprio CO₂ e compósitos, as quais se encontravam todas já em escala comercial.

Além disso, a maioria das categorias de produtos é explorada em projetos em diferentes graus de maturidade. Um exemplo é a biomassa de algas, que aparece em projetos desde o nível bancada até a escala comercial.

Convém ressaltar, entretanto, que não foi possível, considerando a amostra de projetos mapeados, estabelecer uma relação direta entre a natureza dos produtos e o grau de maturidade dos projetos.

5. CONCLUSÃO

A partir da análise dos projetos mapeados, foi possível responder às perguntas explicitadas na introdução do presente trabalho. De forma geral, percebe-se uma tendência recente de aumento no interesse pela utilização do CO₂ como matéria-prima, haja vista o

aumento do número de notícias voltadas para o assunto. No entanto, a discussão acerca das dimensões analisadas sugere um desenvolvimento tecnológico ainda em baixo grau de maturidade e com pouca inovação de produto.

No que diz respeito aos atores, observou-se a participação de empresas, universidades, e organizações de pesquisa. Os resultados obtidos apontaram para a predominância de lideranças oriundas dos Estados Unidos, país que concentra, também, o maior número de projetos. Além disso, observou-se uma participação expressiva de empresas dos setores de biocombustíveis e químicos verdes, tecnologia, gases industriais e materiais avançados na liderança dos projetos, bem como um predomínio de empresas estabelecidas, ainda que muitas fundadas recentemente, a partir do ano 2000.

Verificou-se a existência de alguma forma de financiamento em 39,5% dos projetos mapeados, com destaque para o Departamento de Energia dos Estados Unidos como agente financiador, e de relações de parceria em 65,1%, sendo mais frequentes os acordos para fornecimento de matéria-prima e o desenvolvimento conjunto de tecnologia. Ademais, observou-se a maior recorrência de projetos envolvendo uma ou duas organizações.

No que tange à matéria prima, observou-se que a principal fonte de CO₂ utilizada nos projetos foi o gás carbônico gerado em processos de fermentação, sobretudo na produção de biocombustíveis. Além disso, outros setores, responsáveis pela emissão de grandes volumes de dióxido de carbono, foram contemplados nas iniciativas como fontes de gás carbônico. Um pouco menos da metade dos projetos apresentaram fornecedor definido de CO₂, em muitos casos estabelecidos através dos acordos de parceria.

Em termos de tecnologia, apesar da presença significativa de bases tecnológicas tradicionais, a biotecnologia se destacou como rota mais recorrentemente adotada nos projetos, e os processos de aproveitamento de CO₂ se mostraram pautados no uso de fontes renováveis

de energia. Observou-se, também, que 57,5% das iniciativas se encontram em escala de bancada ou piloto, evidenciando o baixo grau de maturidade de grande parte das tecnologias.

No que diz respeito aos produtos obtidos e suas aplicações, verificou-se a predominância de produtos classificados como *drop-in* e *commodities*, sendo notável também o uso do próprio CO₂ purificado e/ou liquefeito como produto. Isso indica que o aproveitamento de dióxido de carbono como matéria-prima tem seguido um movimento de substituição de produtos de origem fóssil por produtos obtidos a partir de fontes renováveis, e que a competição com os produtos oriundos de fontes fósseis está centrada no fator custo e não na diferenciação.

No geral, foi possível perceber uma convergência para o mercado de combustíveis, com a utilização do dióxido de carbono para a produção direta de combustíveis ou de intermediários utilizados para a sua obtenção. Além disso, observou-se uma presença expressiva do setor de gases industriais, em um fenômeno de diversificação da fonte de obtenção de CO₂ porém com a manutenção de sua atividade original.

Devido à utilização de uma única fonte de informações, é possível que alguns projetos existentes para o aproveitamento de CO₂ não tenham sido identificados. Além disso, o trabalho apresenta como limitação o fato de a identificação das lideranças e as classificações no que diz respeito ao setor das organizações líderes, aos tipos de parceria e à natureza dos produtos terem sido realizada de forma indutiva, implicando em certo grau de subjetividade.

Como trabalho futuro, seria interessante a aplicação da metodologia desenvolvida para outras fontes de informação a fim de verificar a possibilidade de identificação de outras iniciativas, assim como a busca em bases de patentes e artigos científicos de forma a identificar outras tecnologias para aproveitamento do CO₂ e possíveis produtos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMPELLI, C.; PERATHONER, S.; CENTI, G. CO utilization: an enabling element to move to a resource and energy-efficient chemical and fuel production. **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**. mar. 2015.

ANWAR, M. N.; FAYYAZ, A.; SOHAIL, N. F.; KHOKHAR, M. F.; BAQAR, M.; KHAN, W. D.; RASOOL, K.; REHAN, M.; NIZAMI, A. S. CO₂ capture and storage: A way forward for sustainable environment. **Journal of Environmental Management**, v, 226, p. 131-144, nov. 2018.

AIR LIQUIDE. **Large Air Separation Unit**, 2019. Disponível em: <https://www.engineering-airliquide.com/large-air-separation-unit>. Acesso em 01 dez. 2019.

BILLIG, E.; DECKER, M.; BEZINGER, W.; KETELSEN, F.; PFEIFER, P.; PETERS, R.; STOLTEN, D.; THRÄN, D. Non-fossil CO₂ recycling—The technical potential for the present and future utilization for fuels in German. **Journal of CO₂ Utilization**, v. 30, p. 130-14, jan. 2019.

BP. **Statistical Review of World Energy**, 2019. Disponível em: <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>. Acesso em jun. 2019.

BRUHN, T.; NAIMS, H.; OLFE-KRÄUTLEIN, B. Separating the debate on CO₂ utilisation from carbon capture and storage. **Environmental Science and Policy**, v. 60, p. 38-43, jun. 2016.

CARBON ENGINEERING. **Our Technology**, 2019. Disponível em: <https://carbonengineering.com/our-technology/>. Acesso em 01 dez. 2019.

CHEMICALOGIC CORPORATION. **Carbon Dioxide: Temperature - Pressure Diagram**. 1999. Disponível em: http://www.chemicalogic.com/Documents/co2_phase_diagram.pdf. Acesso em 15 out. 2019

CLIMEWORKS. **Our Tecnology**, 2019. Disponível em: <https://www.climeworks.com/our-technology/>. Acesso em 01 dez. 2019.

DEPARTMENT OF ENERGY (DOE). **Carbon Utilization**, 2019. Disponível em: <https://www.energy.gov/fe/carbon-utilization>. Acesso em 02 dez. 2019.

DEPARTMENT OF ENERGY (DOE), **Moving Beyond Drop-In Replacements: Performance-Advantaged Biobased Chemicals**, 2018. Disponível em: <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2018/06/f53/Performance-Advantaged%20Biobased%20Chemicals%20Workshop%20Report.pdf>. Acesso em 27 jan. 2020.

GIBBINS, J. Imperial College London, New Europe, New Energy. Oxford, 2006. Disponível em:

<http://www.inference.org.uk/cps/energy/JonGibbins.pdf>. Acesso em 01 dez. 2019.

GILFILLAN, D.; MARLAND, G.; BODEN, T.; ANDRES, R.. **Global, Regional, and National Fossil-Fuel CO₂ Emissions**. Carbon Dioxide Information Analysis Center at Appalachian State University, Boone North Carolina, 2019. Disponível em: <https://energy.appstate.edu/research/work-areas/cdiac-appstate>. Acesso em 27 set. 2019.

GLOBAL CARBON ATLAS. **Fossil Fuels Emissions**, 2019. Disponível em: <http://globalcarbonatlas.org/en/CO2-emissions>. Acesso em 20 nov. 2019.

GLOBAL THERMOSTAT. **A Unique Capture Process**, 2019. Disponível em: <https://globalthermostat.com/a-unique-capture-process/>. Acesso em 01 dez. 2019.

HALMILTON, W. F. The dynamics of technology and strategy. **European Journal of Operational Research**, v. 47, p. 141-152, 1990.

HOMFELDT, F.; RESE, A.; SIMON, F. Suppliers versus startups: Where do better innovation ideas come from? **Research Policy**, v. 48, n. 7, p. 1738-1757, set. 2019.

INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage**, 2005. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/srccs_wholereport-1.pdf. Acesso em 15 out. 2019.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **CO₂ Emissions from Fuel Combustion: Overview**, 2019. Disponível em: https://webstore.iea.org/download/direct/2505?fileName=CO2_Emissions_from_Fuel_Combustion_2019_Overview.pdf

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Global Status of CCS 2019**, 2019. Disponível em: <https://www.globalccsinstitute.com/resources/global-status-report/>.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Putting CO₂ to Use: Creating value from emissions**, 2019. Disponível em: <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2018/06/f53/Performance-Advantaged%20Biobased%20Chemicals%20Workshop%20Report.pdf>

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Capture**, 2019. Disponível em: <https://www.iea.org/topics/carbon-capture-and-storage/capture/>. Acesso em 30 nov. 2019.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Storage**, 2019. Disponível em: <https://www.iea.org/topics/carbon-capture-and-storage/storage/>. Acesso em 01 dez. 2019.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Utilisation**, 2019. Disponível em: <https://www.iea.org/topics/carbon-capture-and-storage/utilisation/>. Acesso em 02 dez. 2019.

JIN, H.; ISHIDA, M. A new type of coal gas fueled chemical-looping combustion. **Fuel**, v. 83, n. 17-18, p. 2411-2417, dez. 2004.

KOHLI, R.; MITTAL, K. L. Developments in Surface Contamination and Cleaning Techniques. v. 11. Elsevier, 2019.

KOYTSOUMPA, E. I.; BERGINS, C.; KAKARAS, E. The CO₂ economy: Review of CO₂ capture and reuse technologies. **The Journal of Supercritical Fluids**, v. 132, p. 3-16, fev. 2018.

KULKARNI, A. R.; SHOL, D. S. Analysis of Equilibrium-Based TSA Processes for Direct Capture of CO₂ from Air. **Ind. Eng. Chem. Res**, v. 51, p. 8631-8645, jun. 2012

LEONZIO, G; FOSCOLO, P. U.; ZONDERVAN, E. Sustainable utilization and storage of carbon dioxide: analysis and design of an innovative supply chain. **Computers and Chemical Engineering**. set. 2019.

LEUNG, D. Y. C.; CARAMANNA, G.; MAROTO-VALER, M. M. An overview of current status of carbon dioxide capture and storage technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 39, p. 426-443, nov. 2014.

NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES, ENGINEERING, AND MEDICINE. **Gaseous Carbon Waste Streams Utilization**, 2019. Disponível em: <https://www.nap.edu/read/25232/chapter/6>. Acesso em 02 dez. 2019.

NORTH, M.; STYRING, P. Perspectives and visions on CO₂ capture and utilization. **Faraday Discuss**, v.183. p. 489-502. set. 2015.

PERRY, H. R; GREEN, D. W. **Perry's Chemical Engineers' Handbook**, 7. ed, McGraw-Hill, 1997. p. 2-188.

RAO, A. B.; RUBIN, E. S. A Technical, Economic, and Environmental Assessment of Amine-Based CO₂ Capture Technology for Power Plant Greenhouse Gas Control. **Environmental Science & Technology**, v. 36, n. 20, p. 4467-4475, jun. 2002

RODRIGUES, C. A. Gaseificação Integrada ao Ciclo Combinado como Alternativa para a Produção de Eletricidade e Hidrogênio em Refinarias de Petróleo. Curitiba, 2010.

SCHIEB, P. A.; LESCIEUX-KATIR, H.; THÉNOT, M.; CLÉMENT-LAROSIÈRE, B. **Biorefinery 2030: Future Prospects for the Bioeconomy**, Springer, 2014.

STEENEVELDT, R; BERGER, B.; TORP, T. A. CO₂ Capture and Storage: Closing the Knowing-Doing Gap. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 84, n. 9, p. 739-763, set. 2006.

STYRING, P.; JANSEN, D.; CONINCK, H.; REITH, H.; ARMSTRONG, K. **Carbon Capture and Utilisation in the green economy**, 2011. Disponível em: <http://co2chem.co.uk/wp-content/uploads/2012/06/CCU%20in%20the%20green%20economy%20report.pdf>

TARGUETA, J. P. Análise das Iniciativas Empresariais Voltadas ao Aproveitamento da Lignina como Matéria-Prima. Rio de Janeiro, 2019.

UK CCS RESEARCH CENTRE. **Pre-Combustion Capture**, 2019. Disponível em: <https://ukccsrc.ac.uk/about/what-ccs/capture/pre-combustion-capture>. Acesso em 26 nov. 2019.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE (UNFCCC). **National Inventory Submissions 2019**, 2019. Disponível em: <https://unfccc.int/process-and-meetings/transparency-and-reporting/reporting-and-review-under-the-convention/greenhouse-gas-inventories-annex-i-parties/national-inventory-submissions-2019>. Acesso em jun. 2019.

USGS. **Mineral Commodities Summaries: Cement, U.S. Geological Survey**, 2019. Disponível em: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/cement/>

WANG, Y.; ZHAO, L.; OTTO, A.; ROBINIUS, M.; STOLTEN, D. A Review of Post-combustion CO₂ Capture Technologies from Coal-fired Power Plants. **Energy Procedia**, v. 114, p. 650-556, jul. 2017.

WILCOX, J. **Carbon Capture**. Springer. Nova York, 2012.

XIE, H.; LI, X.; FANG, Z.; WANG, Y.; LI, Q.; SHI, L.; BAI, B.; WEI, N.; HOU, Z. Carbon geological utilization and storage in China: current status and perspectives. **Acta Geotechnica**, v.9, p. 7-27, fev. 2014.

ZERO EMISSION RESOURCE ORGANISATION. **What is CCS**, 2019. Disponível em: <http://www.zeroco2.no/introduction/what-is-ccs>. Acesso em 01 dez. 2019.