

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

LARISSA PIRES OTONI

A DESCARBONIZAÇÃO E A IMPORTÂNCIA DO GÁS
NATURAL COMO FONTE DE ENERGIA NO PROCESSO
DE TRANSIÇÃO ENERGÉTICA

SÃO CARLOS -SP

2023

LARISSA PIRES OTONI

A descarbonização e a importância do gás natural como fonte de energia no processo de transição energética

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos, para obtenção do título de bacharel em engenharia química.

Orientador(a): Vádila Giovana Guerra Bettega

São Carlos-SP

[2023]

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e Tecnologia

Folha de aprovação

Assinatura dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de bacharelado do candidato Larissa Pires Otoni, realizada em 28/08/2023:

Prof. Dr. José Maria C. Bueno
Universidade Federal de São Carlos

Profa. Dra. Vádila Giovana Guerra Bettega
Universidade Federal de São Carlos

Profa. Dra. Rosineide Gomes da Silva Cruz
Universidade Federal de São Carlos

Dedico este trabalho aos meus pais, José Wilson e Teresinha, às minhas irmãs, Débora e Patrícia, aos meus avós, meus sobrinhos e todos os que estiveram comigo nesta trajetória.

DEDICATÓRIA

Agradeço aos meus pais, José Wilson e Teresinha, por nunca medirem esforços para que eu chegasse até aqui. Pelo apoio incondicional em todas as minhas decisões, pelos direcionamentos e conselhos que me guiaram neste caminho. Por todo o incentivo à minha educação, sempre proporcionando o melhor e por estarem sempre presentes. Tudo que sou hoje, é graças a vocês, e à família unida que construíram juntos.

Às minhas irmãs, Débora e Patrícia, por sempre me motivarem e acreditarem em mim. Por todo o suporte e conselhos nos momentos difíceis. Vocês são a minha maior inspiração.

À toda a minha família, em especial aos meus avós, meus sobrinhos e cunhados, que mesmo de longe, estão sempre torcendo pelas minhas conquistas.

À República Tudo Pela Dona, que se tornou a minha segunda família em São Carlos durante essa trajetória, pela nossa irmandade e por todos os momentos compartilhamos. Vocês foram a luz que eu precisava para retomar o meu caminho e chegar até aqui.

À minha orientadora, Vádila, pelo apoio contínuo e orientação durante o desenvolvimento deste trabalho.

À Universidade Federal de São Carlos e a todos os meus professores, por todos os ensinamentos que contribuíram para o meu crescimento, tanto profissional, quanto pessoal.

RESUMO

Em um cenário de condições climáticas extremas e desastres naturais sendo cada vez mais frequentes, a preocupação com as questões ambientais têm ganhado cada vez mais espaço nas discussões políticas, sociais e econômicas. O aquecimento global, uma das principais pautas em meio às discussões, é em sua grande maioria intensificado pela alta crescente de emissão de gás carbônico (CO₂) na atmosfera, junto com outros gases do efeito estufa (GEE). Grande parte desse CO₂ emitido provém da geração de energia, sendo que, atualmente, a maioria ainda é a partir de fontes não renováveis. Nesse contexto, destacam-se as discussões sobre a transição energética e a descarbonização, na busca por um equilíbrio entre acessibilidade, confiabilidade e sustentabilidade. O desenvolvimento e o investimento em fontes renováveis é a principal pauta em um contexto ideal de transição energética, porém a adaptação da infraestrutura para receber esse tipo de geração, de uma forma que atenda toda a demanda mundial é um processo que pode ser demorado e influenciar na redução da emissão de gás carbônico nos próximos anos, impactando definitivamente os resultados a longo prazo. Dessa forma, a geração a partir do gás natural entra como um aliado na redução da emissão a curto prazo. Quando comparado a outros combustíveis fósseis, o gás natural apresenta uma vantagem ambiental significativa: uma redução de 20 a 23% na emissão de gás carbônico, quando comparado à geração a partir dos óleos combustíveis e 40 a 50% na redução quando comparado aos combustíveis sólidos como o carvão mineral. Apesar das vantagens com relação a outros combustíveis fósseis, o gás natural ainda é uma fonte não renovável e consideravelmente presente na emissão de CO₂, por isso, deve-se ressaltar a sua utilização como uma fonte de energia de transição para outras fontes renováveis, como a biomassa ou o hidrogênio. Assim sendo, o objetivo deste trabalho de graduação é fazer uma revisão da literatura que aborde os aspectos que levam ao uso do gás natural como um meio de transição para a adaptação mundial em geração de energia através de fontes renováveis.

Palavras-chave: Descarbonização, Transição Energética, Gás Natural

ABSTRACT

In a scenario of extreme weather conditions and increasingly frequent natural disasters, concern for environmental issues has been gaining more prominence in political, social, and economic discussions. Global warming, one of the central topics in these discussions, is mostly exacerbated by the steadily increasing emission of carbon dioxide (CO₂) into the atmosphere, along with other greenhouse gases (GHGs). A significant portion of this emitted CO₂ comes from energy generation, with the majority still originating from non-renewable sources. In this context, discussions about energy transition and decarbonization stand out, as we seek a balance between accessibility, reliability, and sustainability. The development and investment in renewable sources take center stage in an ideal energy transition context. However, adapting the infrastructure to accommodate this type of generation in a way that meets global demand can be a time-consuming process, impacting the reduction of carbon dioxide emissions in the coming years and, consequently, definitively influencing long-term outcomes. Therefore, natural gas generation emerges as a short-term ally in emission reduction. When compared to other fossil fuels, natural gas boasts a significant environmental advantage: a 20 to 23% reduction in CO₂ emissions from fuel oils and 40 to 50% reduction from solid fuels like coal. Despite its advantages over other fossil fuels, natural gas remains a non-renewable source and significantly contributes to CO₂ emissions. For these reasons, its usage should be emphasized as a transitional energy source towards other renewables such as biomass or hydrogen. Therefore, the objective of this undergraduate work is to conduct a literature review addressing the aspects that lead to the utilization of natural gas as a means of transitioning to global adaptation in energy generation through renewable sources.

Key words: Decarbonization, Energy Transition, Natural Gas

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|--|----|
| Figura 1: Total de emissões de gases do efeito estufa de 1991 a 2019. | 16 |
| Figura 2: Total de emissões de CO2 por setor de 1991 a 2019..... | 17 |
| Figura 3: Emissão de CO2 por país, do setor de energia, de 1991 a 2019. | 19 |
| Figura 4: Redução da emissão de CO2 provenientes da substituição do uso de carvão por gás natural em comparação com 2010. | 26 |
| Figura 5: Detalhamento das reduções cumulativas de emissões nos Estados Unidos em relação à projeção da linha de base desde 2010 | 28 |
| Figura 6: revisão de produção de gás natural comercializável no Canadá com as atuais políticas de redução de emissões. | 32 |
| Figura 7: Tipos de gás: Gás Associado e Gás Não Associado..... | 34 |
| Figura 8: Representação esquemática da cadeia produtiva da indústria de gás natural..... | 37 |
| Figura 9: Principais etapas do processamento primário em uma instalação de produção | 39 |
| Figura 10: Separador bifásico horizontal..... | 40 |
| Figura 11: Separador trifásico vertical..... | 41 |
| Figura 12: Fluxograma de uma turbina a gás ciclo simples | 45 |
| Figura 13: Fluxograma simplificado de uma termoelétrica de ciclo combinado | 46 |
| Figura 14: Projetos de Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono na geração de energia (operação e em desenvolvimento). | 49 |
| Figura 15: Processo para captura do CO2 pré combustão..... | 50 |
| Figura 16: Processo de captura de CO2 pós combustão..... | 52 |
| Figura 17: Princípio da captura de CO2 da combustão de oxícombustível..... | 53 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1: Composição molar típica do gás natural | 33 |
|--|----|

LISTA DE SIGLAS

COP - Conferência das partes

GEE - Gases do efeito estufa

CO₂ - gás carbônico

CH₄ - Metano

HFCs - hidrofluorcarbonetos

PFCs - perfluorcarbonetos

SF₆ - hexafluoreto de enxofre

IEA - International Energy Agency

UNFCCC - Convenção quadro das Nações Unidas sobre mudanças do clima.

COP - Conferência das Partes

NDCs - Nationally Determined Contributions

IPCC - Painel Intergovernamental sobre mudanças climáticas

UE - União Europeia

GN - Gas natural

PIB - Produto Interno Bruto

OPEC - Organização dos países produtores de petróleo

UPGN - Unidade e processamento de gás natural

LGN - Líquido de gás natural

GLP - gás liquefeito de petróleo

JT - Joule-Thompson

GNL - Gás natural liquefeito

GNC - Gás natural comprimido

CCUS - captura, utilização e armazenamento do carbono

IGCC - ciclo combinado e gaseificação integrada

RFG - Recycled flue gas

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO | 13 |
| 2. OBJETIVO..... | 15 |
| 3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA..... | 16 |
| 3.1. CONTEXTO ENERGÉTICO ATUAL | 16 |
| 3.1.1. EMISSÃO DE CO ₂ | 16 |
| 3.1.2. CONFERÊNCIAS CLIMÁTICAS MUNDIAIS..... | 19 |
| 3.2. TRANSIÇÃO ENERGÉTICA | 21 |
| 3.2.1. O TRILEMA DA ENERGIA | 21 |
| 3.2.2. FONTES RENOVÁVEIS..... | 23 |
| 3.2.3. O GÁS NATURAL COMO FONTE DE TRANSIÇÃO | 25 |
| 4. GÁS NATURAL..... | 33 |
| 4.1. CARACTERÍSTICAS DO GÁS NATURAL | 33 |
| 4.2. MERCADO DO GÁS NATURAL..... | 35 |
| 4.3. CADEIA PRODUTIVA DO GÁS NATURAL | 37 |
| 4.3.1. UPSTREAM..... | 38 |
| 4.3.2. MIDSTREAM..... | 41 |
| 4.3.3. DOWNSTREAM | 43 |
| 4.4. A GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DO GÁS NATURAL..... | 44 |
| 4.4.1. TERMELÉTRICAS DE CICLO SIMPLES | 44 |
| 4.4.2. TERMOELÉTRICAS DE CICLO COMBINADO | 45 |
| 4.4.3. ADAPTAÇÃO DA INFRAESTRUTURA DE TERMELÉTRICAS | 47 |
| 4.5. CAPTURA, UTILIZAÇÃO E ARMAZENAMENTO DE CARBONO (CCUS) | 48 |

| | | |
|-----------|--|------------------|
| 4.5.1. | CAPTURA DE CO2 PRÉ COMBUSTÃO | 50 |
| 4.5.2. | CAPTURA DE CO2 PÓS COMBUSTÃO | 51 |
| 4.5.3. | COMBUSTÃO COM OXIGÊNIO (OXI-FUEL)..... | 52 |
| 5. | <u>FONTES POTENCIAIS A LONGO PRAZO: HIDROGÊNIO E BIOGÁS</u> | <u>54</u> |
| 5.1. | BIOGÁS..... | 54 |
| 5.2. | HIDROGÊNIO | 55 |
| 6. | <u>DISCUSSÃO</u> | <u>57</u> |
| 7. | <u>CONCLUSÃO</u> | <u>60</u> |
| | <u>REFERÊNCIAS</u> | <u>61</u> |

1. INTRODUÇÃO

O cenário climático é um dos desafios mais urgentes e complexos que a humanidade enfrenta na atualidade. À medida que o planeta enfrenta mudanças significativas nas condições climáticas, com o aumento da temperatura e eventos extremos, como a elevação no nível do mar, é cada vez mais evidente que as ações humanas para conter essas mudanças desempenham um papel fundamental nesse cenário.

A temperatura da superfície global atingiu um aumento de 1,1°C em 2011-2022 com relação a 1850-1900 (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023), número que causa um enorme alerta no cenário mundial. A emissão excessiva de gases do efeito estufa (GEE), por meio das ações humanas, têm sido a principal causa do aquecimento global. Nos últimos anos, as emissões globais dos GEEs continuaram a aumentar, com contribuições desiguais devido ao uso insustentável de energia, padrões de vida e alto consumo, geração excessiva de resíduos, mudanças no uso de terra e altos níveis de desmatamento.

As mudanças climáticas causadas pela atividade humana já estão apresentando impactos em diversos eventos climáticos extremos e fenômenos meteorológicos em todo o mundo. Isso leva a consequências generalizadas, como impactos na saúde humana, na sociedade e economias, problemas de insegurança alimentar e hídrica, além de incontáveis perdas relacionadas à vida e à natureza. É importante ressaltar que a parcela da população que historicamente menos contribuiu para as atuais mudanças climáticas, é a mais afetada pelas mesmas, por inúmeras questões políticas e sociais.

Com isso, a necessidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa têm impulsionado a busca por alternativas mais sustentáveis e ambientalmente responsáveis na matriz energética mundial. A transição energética surgiu como um dos principais desafios do século XXI, visando alcançar um equilíbrio entre o fornecimento de energia, a confiabilidade do sistema e a mitigação dos impactos ambientais. Nesse contexto, a descarbonização, ou seja, a redução significativa das emissões de carbono, tem se

tornado uma meta fundamental para alcançar esse equilíbrio entre a sustentabilidade e o desenvolvimento das nações.

Dentro desse panorama de mudanças, o gás natural tem se destacado como uma fonte de energia crucial no processo de transição energética. Sua utilização como combustível tem ganhado espaço devido a sua relativa menor emissão de CO₂ em comparação com outras fontes fósseis, como o carvão e o óleo combustível, ao mesmo tempo em que pode ser utilizado em infraestruturas já existentes, o que atenderia a demanda energética mundial enquanto a geração de energia a partir de fontes renováveis e com baixa emissão passa pelo processo de desenvolvimento e estabilização dos recursos. Adicionalmente, a disponibilidade abundante de gás natural em diversas regiões do mundo e os avanços em tecnologias de extração e transporte têm contribuído para sua crescente relevância como uma opção viável e versátil.

2. OBJETIVO

Diante do exposto, este trabalho tem como objetivo apresentar uma revisão bibliográfica que explore a importância do gás natural como uma fonte de energia alternativa enquanto a estrutura mundial se prepara para um cenário em que a geração de energia a partir de fontes renováveis e de baixa emissão de gases do efeito estufa seja suficiente para atender a demanda mundial. Foram abordados aspectos ambientais, econômicos e da cadeia de produção do gás natural, assim como as suas vantagens e desafios na busca por uma matriz energética mais sustentável. Além disso, foi abordado o cenário ideal para a descarbonização, trazendo opções sustentáveis para uma matriz energética de baixo carbono, como o hidrogênio e o biogás.

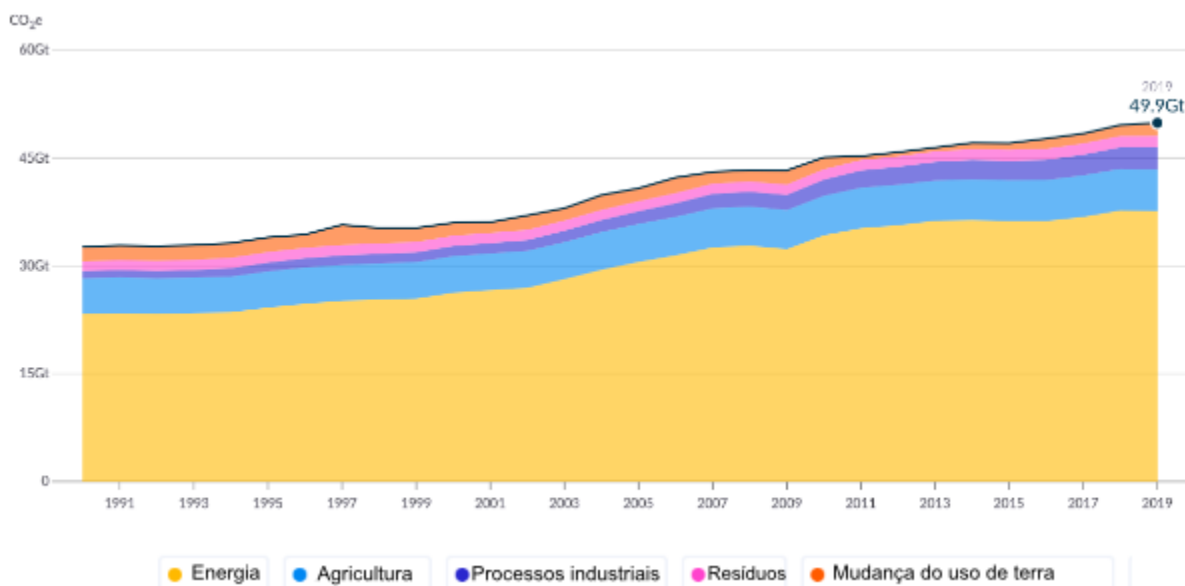
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. CONTEXTO ENERGÉTICO ATUAL

3.1.1. Emissão de CO₂

As emissões globais de gases de efeito estufa aumentaram em 53% de 1990 a 2019. Houve uma diminuição temporária das emissões globais médias de CO₂ em 2020, o que pode ser associado à pandemia do Covid 19, mas a tendência não se sustentou, e as emissões aumentaram novamente em 2021 (Ge *et al.*, 2022). Após a revolução industrial, pode-se observar um aumento significativo da emissão de gases do efeito estufa, devido ao uso de combustíveis fósseis para o uso industrial e geração de energia, juntamente com os elevados níveis de desmatamento. A Figura 1 apresenta a evolução do total de emissões de gases do efeito estufa (GEE) de 1991 a 2019.

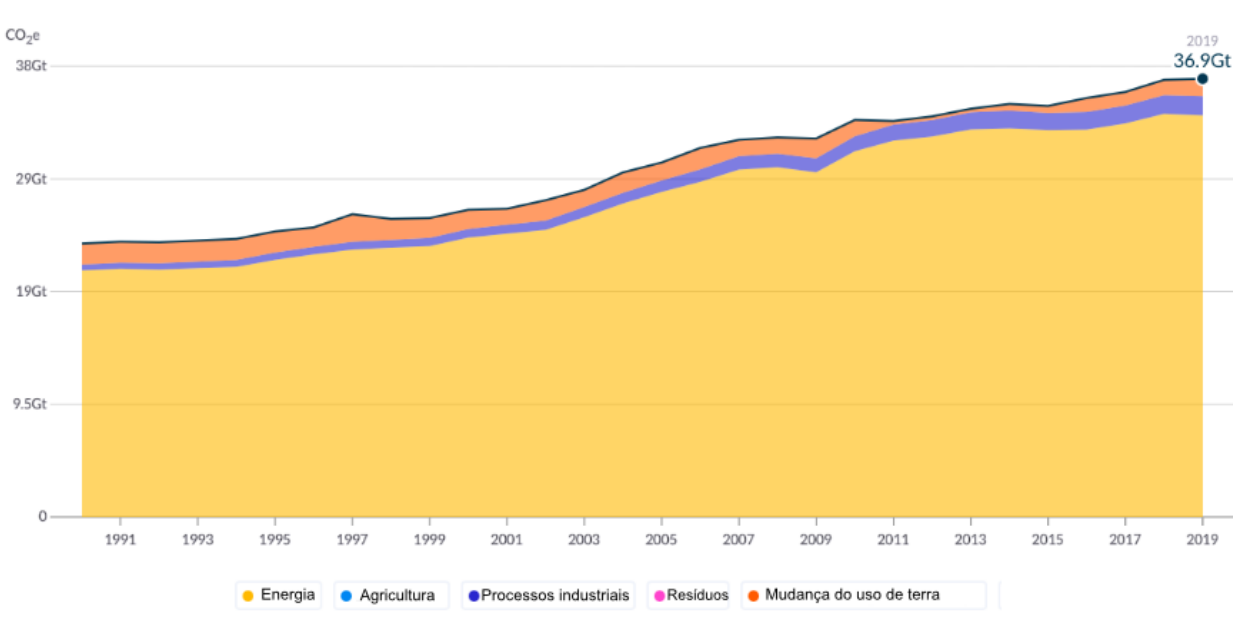
Figura 1: Total de emissões de gases do efeito estufa de 1991 a 2019



Fonte: Adaptado de World resources institute, 2022.

De acordo com dados do relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) de 2021, o dióxido de carbono (CO₂) responde por cerca de 81% das emissões totais de gases do efeito estufa causadas pelo homem. Isso significa que a grande maioria das emissões é atribuída ao CO₂ proveniente de atividades humanas, como a queima de combustíveis fósseis, desmatamento, mudanças no uso da terra e outras atividades industriais. A Figura 2 apresenta a evolução das emissões de gás carbônico por setor, de 1991 a 2019. As outras principais categorias de gases do efeito estufa incluem o metano (CH₄), que representa cerca de 10%, e o óxido nitroso (N₂O), com aproximadamente 7% das emissões totais causadas pelo homem. Além disso, existem outros gases de efeito estufa com contribuições menores, como os hidrofluorcarbonetos (HFCs), perfluorocarbonetos (PFCs) e hexafluoreto de enxofre (SF₆).

Figura 2: Total de emissões de CO₂ por setor de 1991 a 2019

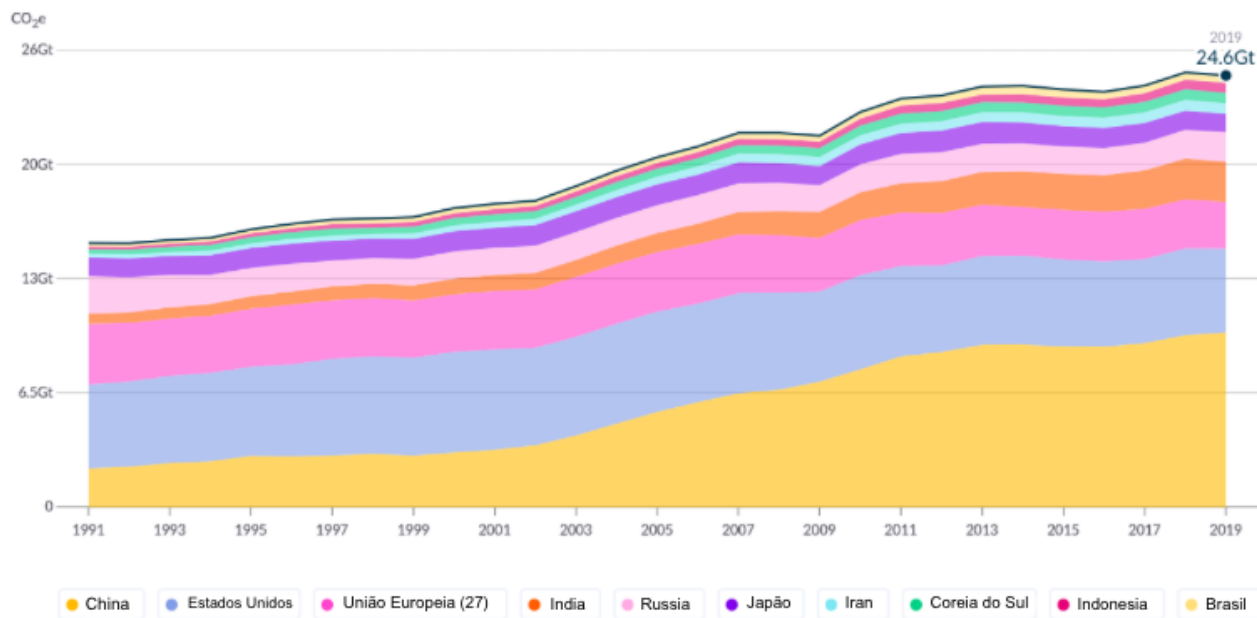


Fonte: Adaptado de World resources institute, 2022

Os principais emissores de CO₂ são geralmente os países industrializados e desenvolvidos, que historicamente têm dependido mais intensamente de combustíveis fósseis em suas atividades econômicas. Países como China, Estados Unidos, Índia e União Europeia são os principais contribuintes para as emissões globais de CO₂. Por outro lado, países em desenvolvimento também têm visto suas emissões crescerem à medida que suas economias se expandem e aumentam a demanda por energia. Dessa forma, os países mais desenvolvidos são os que apresentam um maior potencial de redução de emissão de CO₂.

Das 36,9Gt de gás carbônico emitidas mundialmente para a atmosfera em 2019, aproximadamente 90% foram provenientes do setor de energia, seguido da agricultura e mudança de uso de terra com 12%. O setor de energia envolve a geração de energia elétrica, o transporte rodoviário, aéreo ou marítimo, processos industriais, aquecimento ou resfriamento residencial e outros usos de menor impacto.

A Figura 3 apresenta as emissões de CO₂ dos principais países emissores, considerando apenas o setor de energia. Pode-se observar que a China foi o país que apresentou a maior curva de aumento de emissão nos últimos 30 anos.

Figura 3: Emissão de CO₂ por país, do setor de energia, de 1991 a 2019

Fonte: Adaptado de World resources institute, 2022

De acordo com o relatório "*World Energy Outlook 2020*" publicado pelo *International Energy Agency* (IEA), os combustíveis fósseis foram responsáveis por cerca de 80% da geração total de energia mundial em 2019. Isso inclui a contribuição do carvão, petróleo e gás natural para suprir as necessidades energéticas globais. O relatório destacou que apesar do crescente papel das fontes de energia renovável, os combustíveis fósseis ainda dominam significativamente a matriz energética global. Combustíveis fósseis, devido à sua natureza carbonosa, liberam grandes quantidades de CO₂ quando queimados. Carvão é a fonte mais intensiva em carbono, seguida pelo petróleo e as energias renováveis como solar, eólica e hidrelétrica emitem quantidades mínimas ou nulas de CO₂ durante a operação.

3.1.2. Conferências Climáticas Mundiais

Diante deste cenário, é indiscutível que o tema precisa ser tratado com a devida prioridade. A discussão sobre o contexto climático mundial, apesar de ter ganhado um espaço mais significativo apenas nas últimas décadas, já acontece desde o século passado, nas conferências climáticas mundiais, as quais desempenham um papel crucial na abordagem dessas questões. Compreender e lidar com os desafios impostos pelas mudanças climáticas requer uma união entre os países, levando à ações coletivas e coordenadas mundialmente.

As conferências climáticas, realizadas pela Convenção Quadro das Nações Unidas sobre mudança do clima (UNFCCC), têm sido os fóruns onde são discutidas e negociadas medidas e políticas de combate aos avanços das mudanças climáticas. A UNFCCC foi adotada em 1992, durante a cúpula da Terra, também conhecida como Rio-92, realizada no Rio de Janeiro, e tem como objetivo apoiar a resposta global à ameaça da mudança climática. Ela estabelece um marco internacional para a cooperação global, reconhecendo que a mudança no clima é um problema global que requer ações conjuntas de todos os países, com base nas suas responsabilidades comuns e, ao mesmo tempo, diferenciadas. A convenção busca promover ações para reduzir as emissões de gases do efeito estufa, fornecer apoio financeiro e tecnológico aos países em desenvolvimento, adaptar-se aos impactos das mudanças climáticas e promover a cooperação e a transferência de tecnologia. Anualmente, a UNFCCC realiza a conferência das partes (COP), onde os representantes dos países membros se reúnem para discutir e negociar os acordos e medidas relacionados ao tema. A COP é o principal órgão de decisão da UNFCCC e tem desempenhado um papel fundamental na definição da agenda global de ações climáticas.

Além da Rio-92, outras conferências representaram marcos históricos significativos, como a COP3, que aconteceu em Quioto, no Japão em 1997, a qual ficou conhecida pelo Protocolo de Quioto, que estabeleceu metas de redução de emissão para os países desenvolvidos e introduziu mecanismos como o comércio de emissões. Em 2015, aconteceu em Paris, a COP21, que foi um marco bastante representativo, resultando no Acordo de Paris, o qual busca limitar o aumento da temperatura global a 2°C, e com esforços para que fique abaixo de 1,5°C. Além disso, o acordo estabeleceu as NDCs (Nationally Determined Contributions), compromissos nacionais de mitigação

de emissões. Em 2021, a COP 26, resultou em um documento chamado "Implementação do pacto climático de Glasgow" que previa uma revisão das metas de redução de carbono até 2030 por todos os países que assinaram. A mais recente aconteceu em novembro de 2022, no Egito, e manteve o foco em conter os efeitos das mudanças climáticas considerando a redução da emissão dos gases do efeito estufa.

3.2. TRANSIÇÃO ENERGÉTICA

Tendo em vista o considerável aumento das emissões de gases do efeito estufa mundialmente, a transição energética e a descarbonização da geração de energia têm se tornado questões de extrema importância no contexto atual. Diante dos desafios apresentados pelas mudanças climáticas e da necessidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa, a busca por fontes de energia mais limpas e sustentáveis tornou-se uma prioridade global. A transição energética envolve a mudança gradual de uma matriz energética baseada em combustíveis fósseis para fontes renováveis e de baixa emissão de carbono. Ao mesmo tempo, a descarbonização da geração de energia visa reduzir ou eliminar completamente as emissões de gases causadores do efeito estufa provenientes do setor elétrico.

3.2.1. O Trilema da Energia

O trilema energético é um conceito que tem sido amplamente discutido no campo da energia. O documento "*World Energy Trilemma*" foi publicado pelo conselho mundial de energia, em colaboração com a empresa global de consultoria em gestão Oliver Wyman, com o objetivo de analisar e fornecer visões sobre os desafios e oportunidades relacionados à sustentabilidade, segurança e acessibilidade da energia em nível global. O conceito refere-se aos três objetivos conflitantes que os sistemas de energia enfrentam ao buscar um equilíbrio entre três dimensões principais: sustentabilidade ambiental, segurança energética e acessibilidade econômica.

A sustentabilidade ambiental aborda a necessidade de reduzir as emissões de gases do efeito estufa e mitigar os impactos ambientais negativos associados à produção e consumo de energia. Esse aspecto enfoca a transição para fontes de energia limpas e renováveis, a eficiência energética, a conservação dos recursos naturais e a proteção do meio ambiente.

O contexto da segurança energética refere-se à capacidade de fornecer energia de forma confiável e resiliente, garantindo o abastecimento contínuo e a estabilidade do sistema energético. Isso inclui diversificar as fontes de energia, reduzir a dependência de importações, garantir uma infraestrutura abrangente, promover a resiliência do sistema e minimizar os riscos de interrupção do fornecimento de energia.

A dimensão da acessibilidade econômica diz respeito à disponibilidade e ao custo da energia para os consumidores. É importante garantir que a energia seja acessível e a preços razoáveis, para que indivíduos, empresas e economias como um todo possam contar com o recurso. Isso envolve considerar a eficiência do sistema energético, buscar soluções de energia com custo-benefício adequado e mitigar o impacto das desigualdades energéticas.

O desafio do trilema da energia é encontrar um equilíbrio entre essas três dimensões, reconhecendo que nem sempre é possível atingir simultaneamente os três objetivos de forma ideal. Algumas opções de energia podem ser mais acessíveis economicamente, porém menos sustentáveis ambientalmente. Encontrar soluções que sejam sustentáveis, seguras e acessíveis requer um planejamento cuidadoso e uma abordagem equilibrada, considerando as características e necessidades específicas de cada região e contexto.

Esse conceito auxilia a destacar a complexidade das decisões e políticas relacionadas à energia, incentivando a busca por soluções que otimizem essas três dimensões fundamentais. À medida que a transição energética avança, é essencial considerar o trilema energético para garantir que os sistemas energéticos do futuro sejam sustentáveis, seguros e acessíveis.

3.2.2. Fontes Renováveis

A pesquisa e o desenvolvimento de novas fontes de energia renováveis tem se mostrado cada vez maior nos últimos anos, visto todo o contexto ambiental e o espaço que esse tema tem ganhado em todo o mundo. Apesar da geração de energia ainda ser, em sua grande maioria, através de combustíveis fósseis, muitos países já consideram outras fontes de energia para suprir a demanda energética. A busca por alternativas envolve inúmeras questões e particularidades geográficas, econômicas e sociais de cada região. Os principais intuitos dessa substituição é a não dependência de fontes não renováveis e também a redução da emissão dos gases do efeito estufa em toda a cadeia de geração e consumo da energia.

Alguns tipos de geração já são mais comuns no contexto atual, como a energia solar, a energia eólica e a energia hidrelétrica. Fatores como a redução considerável de emissão de gás carbônico e o fato de serem fontes inesgotáveis e limpas, as tornam fontes ideais em um cenário onde seja possível que elas atendam as três dimensões do trilema energético. No entanto, a utilização exclusiva dessas fontes ainda enfrenta grandes desafios, e que são de difícil solução em curto prazo. Essas fontes não garantem a segurança energética necessária, visto que são fontes extremamente suscetíveis à sazonalidade, o que pode resultar em uma geração intermitente e variável. Isso exige o desenvolvimento de soluções de armazenamento de energia e uma rede elétrica flexível e inteligente para lidar com a variabilidade. Além disso, a construção da infraestrutura de toda a cadeia, envolvendo geração, transformação e transmissão dessa energia, pode enfrentar grandes desafios de custos, disponibilidade de espaço e aceitação da comunidade.

A geração de energia a partir da biomassa também tem apresentado um grande potencial de utilização como uma energia limpa. A biomassa envolve o uso de resíduos orgânicos, como resíduos agrícolas, resíduos florestais e resíduos de alimentos, para a geração de energia. Ela pode ser convertida em biogás, bioetanol, biodiesel e até mesmo ser utilizada diretamente para aquecimento e geração de eletricidade. A principal vantagem da biomassa é a utilização de materiais orgânicos renováveis, reduzindo o desperdício e contribuindo para a gestão sustentável dos recursos naturais. No entanto,

é uma fonte relativamente nova, e que apresenta um alto investimento inicial em sua infraestrutura, e na integração com a rede elétrica já existente. Além disso, a geração a partir de compostos orgânicos envolve também uma delicada discussão com relação ao desperdício e a disponibilidade de alimentos, visto que a fome e a insegurança alimentar é uma realidade para uma grande parte da população mundial, mesmo com a abundância de alimentos disponíveis.

Outra fonte que tem sido cada vez mais considerada como uma fonte promissora de energia para impulsionar a transição energética, é o hidrogênio, por apresentar algumas vantagens significativas. É uma fonte de energia limpa, pois sua queima não produz emissões diretas de dióxido de carbono (CO_2). Quando produzido a partir de fontes renováveis, como eletrólise alimentada por energia solar ou eólica, o hidrogênio é considerado "verde" e contribui para a descarbonização da geração de energia. Além disso, ele possui uma alta densidade energética, o que significa que uma quantidade relativamente pequena de hidrogênio pode armazenar uma grande quantidade de energia. Isso torna o hidrogênio uma opção interessante para armazenar energia renovável excedente, permitindo sua utilização posterior quando a geração renovável é limitada. No entanto, a geração de energia a partir do hidrogênio também enfrenta desafios na sua aplicação em um curto prazo. A produção do hidrogênio "verde" a partir de fontes renováveis ainda apresenta desafios tecnológicos e a infraestrutura necessária tanto para produção como para armazenamento requer um alto investimento. Além disso, o hidrogênio é altamente inflamável, e exige precauções adicionais em termos de manuseio, armazenamento e distribuição. É necessário garantir normas de segurança rigorosas para evitar acidentes e garantir a aceitação pública do uso do hidrogênio.

Dessa forma, a implantação maciça de energias renováveis, é considerada a melhor maneira de descarbonizar o sistema de energia. Para que isso seja uma realidade, os operadores do sistema de energia precisam lidar com o desafio da geração intermitente, o que afeta negativamente a estabilidade do sistema. Dessa forma, os sistemas de energia tendem a continuar a depender de geradores firmes, como usinas a gás, no futuro previsível, até que o armazenamento de energia de longa duração se torne comercialmente maduro. Nesse contexto, o gás natural se mostra com potencial

de reduzir as emissões de carbono de tais sistemas se eles estiverem atualmente sendo equilibrados por carvão ou outros geradores de alto carbono (Bugaje *et al.* 2023).

3.2.3. O Gás Natural Como Fonte de Transição

A utilização do gás natural como uma opção de combustível de transição é considerada, principalmente pela presença da infraestrutura já estabelecida em vários países, juntamente com o baixo custo de adaptação das instalações industriais que atualmente dependem de fontes mais poluentes, como o óleo combustível ou o carvão mineral. Porém, de acordo com outros estudos, a presença do gás natural tende a diminuir no futuro, juntamente com a busca pelas metas climáticas globais. A partir de 2040, seu papel será limitado pela ampliação de outras fontes renováveis nas matrizes energéticas dos países, para que suas metas de descarbonização sejam alcançadas (Massachusetts Institute of Technology, 2011). A mudança entre o consumo ininterrupto de combustíveis fósseis, por si só, não oferece uma resposta de longo prazo para a mudança climática, mas pode haver benefícios significativos em termos de CO₂ e qualidade do ar, em países, setores e prazos específicos, com o uso de fontes menos intensivos em emissões (International Energy Agency, 2019).

De acordo com Zhou *et al.* (2021) o papel do gás natural na trajetória em direção à "neutralidade de carbono" pode ser dividido em quatro estágios: de 2020 a 2030, as características de baixo carbono do gás natural irão contribuir para atingir o "pico de emissões de carbono"; de 2030 a 2035, o gás natural será integrado às energias renováveis; de 2035 a 2050, haverá uma integração completa entre o gás natural e as energias renováveis; e de 2050 a 2060, o gás natural continuará a desempenhar um papel de suporte para as energias renováveis.

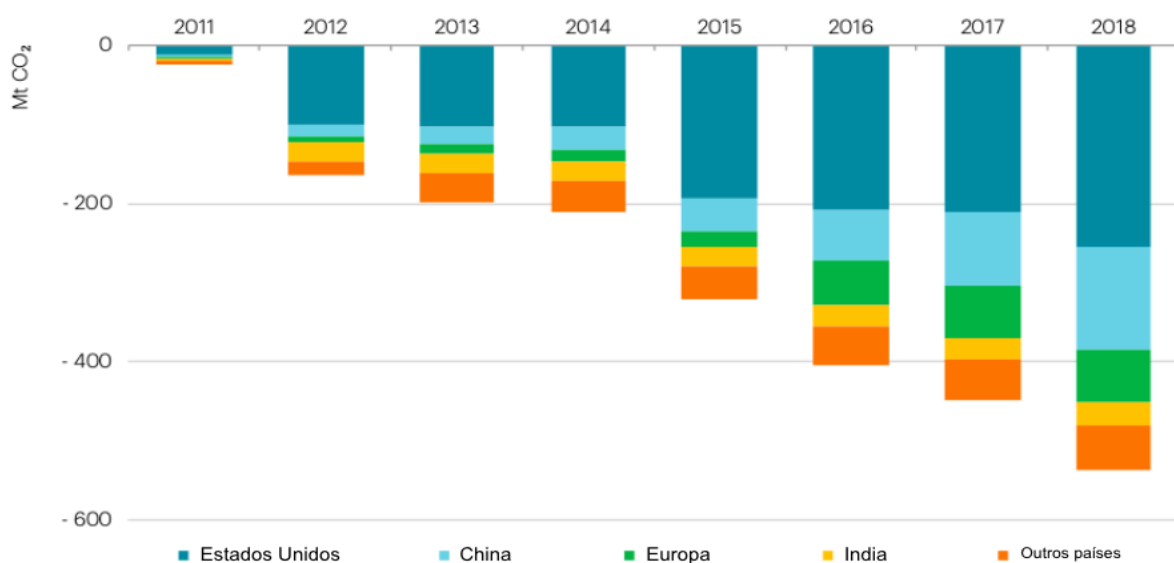
Já em seu primeiro relatório de avaliação, o IPCC indicou que o consumo de gás natural é preferível a outros combustíveis fósseis, levando-o a apoiar a troca de carvão para gás por motivos climáticos (Szabo, 2022). O gás natural apresenta uma vantagem ambiental significativa na substituição de outros combustíveis fósseis. Tem-se uma redução de cerca de 20 a 23% nas emissões de CO₂ quando comparado ao óleo combustível e de 40 a 50% com combustíveis sólidos como o carvão. Além disso, a

utilização do gás em equipamentos apropriados para a sua combustão resultava na eliminação das emissões de óxido de enxofre, fuligem e partículas, enquanto as emissões de monóxido de carbono e óxidos de nitrogênio poderiam ser controladas de forma relativamente eficaz (EPE, 2007).

A substituição de usinas a carvão já existentes por usinas a gás para a geração de eletricidade apresenta "vantagens rápidas" em termos de emissões. De acordo com uma estimativa realizada pela IEA, publicada em 2019, se os preços relativos se mostrarem favoráveis e a regulamentações forem adequadas, até 1.2 gigatoneladas de gás carbônico podem ser reduzidas a curto prazo com essa substituição. A grande maioria desse potencial encontra-se nos Estados Unidos e na Europa. Isso reduziria as emissões globais do setor de energia em 10% e as emissões totais de CO₂ relacionadas à energia em 4%.

O papel e o potencial da economia de emissões provenientes da substituição de carvão por gás natural variam significativamente entre diferentes regiões. A Figura 4 apresenta uma comparação da redução da emissão em quatro diferentes regiões. Essa substituição apresentou uma redução de mais de 500 milhões de toneladas de emissões de CO₂ ao longo desse período.

Figura 4: Redução da emissão de CO₂ provenientes da substituição do uso de carvão por gás natural em comparação com 2010



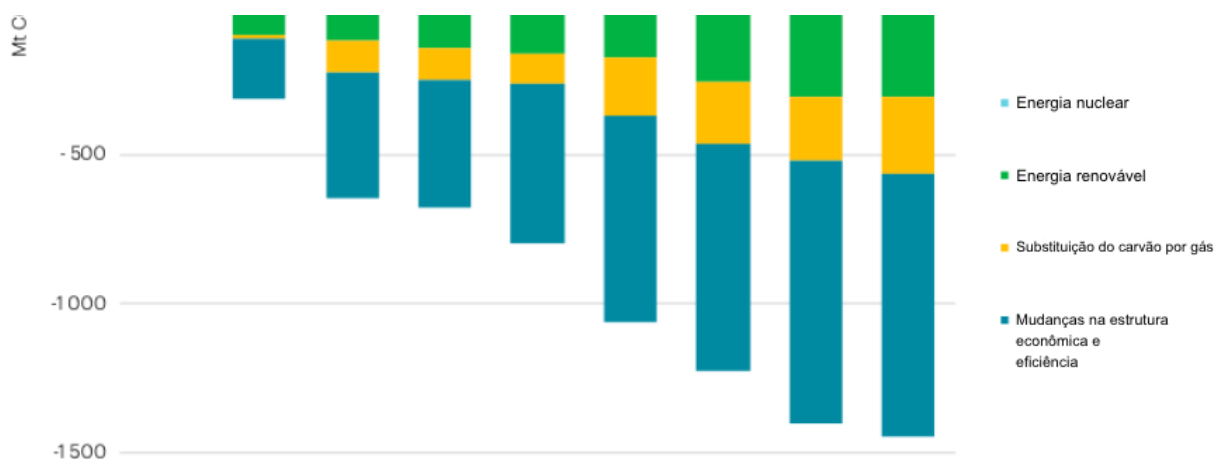
Fonte: Adaptado de IEA 2019

Em sua grande maioria, o maior potencial de economia provindo da substituição por gás está onde existe uma maior possibilidade de utilizar a infraestrutura já existente para fornecer os mesmos serviços de energia, porém com emissões mais baixas. Visto o tempo necessário para desenvolver novas energias renováveis e implementar melhorias na eficiência energética, isso também representa o caminho mais rápido para a redução de emissões. Junto disso, a maioria dessas economias potenciais está nos mercados de energia maduras, com um crescimento relativamente estável na demanda de eletricidade e capacidade significativa de gás ociosa, principalmente nos Estados Unidos e na Europa (IEA, 2019).

3.2.3.1. Estados Unidos

Os benefícios ambientais do uso do gás natural na geração de energia dependem do fato de ele estar substituindo combustíveis mais poluentes, ou seja, carvão e petróleo. No caso dos Estados Unidos, a mudança do carvão para o gás foi responsável por cerca de 18% da economia de emissões de carbono desde 2010, com as reduções restantes atribuídas principalmente a mudanças econômicas estruturais, eficiência energética e energias renováveis. A Figura 5 mostra a representação da redução da emissão de carbono nos Estados Unidos desde 2010.

Figura 5: Detalhamento das reduções cumulativas de emissões nos Estados Unidos em relação à projeção da linha de base desde 2010



Fonte: Adaptado de IEA 2019

O aumento do uso de gás natural na geração de energia tem sido um fenômeno impulsionado pelo mercado, sustentado por amplos suprimentos de gás natural de baixo custo, capacidade ociosa significativa e custos relativamente baixos de adição de capacidade adicional de gás. Em um mercado de energia liberalizado e estabelecido, no qual diferentes fontes de energia competem com base no custo marginal, os preços mais baixos do gás foram alimentados suavemente por mudanças no mix de energia.

Além disso, a infraestrutura existente para a produção e distribuição de gás natural nos Estados Unidos é bem desenvolvida. A extensa rede de gasodutos permite a entrega eficiente do gás natural para usinas de geração de eletricidade em todo o país. Essa infraestrutura existente facilita a transição para o uso de gás natural no setor elétrico, reduzindo a necessidade de grandes investimentos em novas infraestruturas (EIA, 2007).

O resultado foi um aumento de 70% na geração de energia movida a gás natural desde 2005, sendo que o gás agora é responsável por um terço da geração total de eletricidade nos EUA. Houve um declínio correspondente na participação da geração baseada em carvão, que passou de 50% para 30% atualmente. Juntamente com o crescimento das energias renováveis e os avanços na eficiência, a mudança do carvão

para o gás contribuiu para a queda de 21% na intensidade das emissões do setor de energia dos EUA desde 2010 (IEA, 2019).

3.2.3.2. União Europeia

A transição energética no setor elétrico da União Europeia (UE) tem sido um tema importante, com várias iniciativas e estratégias para reduzir as emissões de gases de efeito estufa e promover uma matriz energética mais sustentável. Embora a União Europeia esteja comprometida com a descarbonização e o aumento do uso de energias renováveis, o gás natural ainda desempenha um papel na transição energética na região.

A participação combinada de gás e carvão na matriz energética da União Europeia tem se mantido relativamente estável desde 1980. No entanto, os papéis dos dois combustíveis se inverteram: o uso de gás cresceu de 11% na matriz energética da União Europeia em 1980 para cerca de um quarto atualmente, enquanto o carvão teve uma queda correspondente, com sua participação sendo reduzida pela metade, para 15%. A troca foi impulsionada tanto por desenvolvimentos na demanda quanto na oferta. As descobertas de grandes recursos de gás no Reino Unido e na Holanda proporcionaram o impulso para o aumento do uso de gás nas décadas de 1960 e 1970, que substituiu em grande parte o carvão, bem como o gásóleo. Na Alemanha, o uso de gás em residências também aumentou após as mudanças estruturais na economia após a reunificação em 1990. Atualmente, 75% do carvão restante na União Europeia é consumido no setor de energia, sendo a maior parte utilizada em indústrias intensivas em energia (IEA, 2019).

Devido ao crescimento contido na demanda por eletricidade e aos grandes investimentos realizados no início do século, a União Europeia possui uma capacidade significativa de geração a gás. Isso torna o gás uma opção para substituir a lacuna deixada pelo declínio do carvão (assim como da energia nuclear) na geração de energia em carga de base.

No entanto, a União Europeia importa grande parte do gás natural consumido, em 2021, essa importação foi de 83% (Conselho Europeu, 2023). Durante a maior parte da década de 2010, os altos preços do gás e os baixos preços do carvão impediram o gás de desafiar as usinas termelétricas a carvão na oferta de eletricidade térmica de carga

de base. Aliado ao forte crescimento das energias renováveis, isso deixou as usinas a gás lutando para encontrar um lugar na ordem de mérito em partes da Europa continental. Além disso, a União Europeia enfrenta o desafio da diversificação contínua dos seus fornecedores de gás, visto que a Rússia é responsável pelo fornecimento de uma considerável parcela da demanda, contexto que foi afetado pela invasão da Ucrânia pela Rússia. Apesar de ser um processo que exige altos esforços e investimentos, já é possível perceber um cenário de avanços na diversificação, principalmente pelo comércio de gás natural com os Estados Unidos (Conselho Europeu, 2023).

3.2.3.3. China

Na China, o carvão tem sido a principal fonte de energia por um longo período, exercendo um papel dominante. No entanto, devido ao rápido aumento no consumo energético do país, é crucial substituir o carvão altamente poluente por fontes de energia de baixo carbono ou não fósseis, a fim de reduzir as emissões de dióxido de carbono (Wang *et al.*, 2022). Zhang (2021) pontuou que limitadas, principalmente por sua sazonalidade, as fontes de energia não-fósseis, não são capazes de atender totalmente a enorme demanda de energia da China em um curto prazo. No entanto, ainda contam com um alto nível de dependência do gás natural estrangeiro, e como atender a demanda futura é um desafio do contexto atual.

Com relação à infraestrutura, no geral, ainda existem deficiências na construção, especialmente barreiras institucionais que dificultam a construção de capacidade de redução emergencial de pico. No entanto, com o contínuo avanço das reformas do sistema e o aumento do apoio político em nível nacional, espera-se que as reservas de emergência de gás natural, as capacidades de transmissão e interconexão sejam significativamente melhoradas durante o processo para atender a demanda em um curto prazo. No longo prazo, com o avanço adicional da reforma do mercado de gás natural, o gargalo da construção da infraestrutura será completamente superado e as deficiências serão resolvidas de forma definitiva. (Wang *et al.*, 2022).

3.2.3.4. África

Devido à alta disponibilidade do gás natural no continente, o seu uso tem sido cada vez mais considerado como fonte de energia nos países do continente africano. Visto que muitos países ainda enfrentam dificuldades no acesso à energia, seu uso pode fornecer uma fonte de energia mais acessível e confiável, ajudando a atender às necessidades energéticas da população e impulsionando o desenvolvimento socioeconômico.

Atualmente, cerca de 600 milhões de pessoas na África não têm acesso a serviços modernos de energia, enquanto o continente é responsável por menos de 4% das emissões globais anuais de CO₂. Com exceção da África do Sul, a África Subsaariana é pobre em energia em comparação com o resto do mundo (Ramachandran, 2021). Com relação à segurança energética, a abundância relativa de recursos de GN na África desempenha um papel fundamental no argumento de considerar o GN como o combustível de transição energética da África (Uneca, 2020).

Dessa forma, além de ser um recurso com um alto potencial energético, principalmente devido aos custos envolvidos e a disponibilidade nas proximidades, o gás natural se mostra como uma oportunidade de desenvolvimento dos países mais pobres da África.

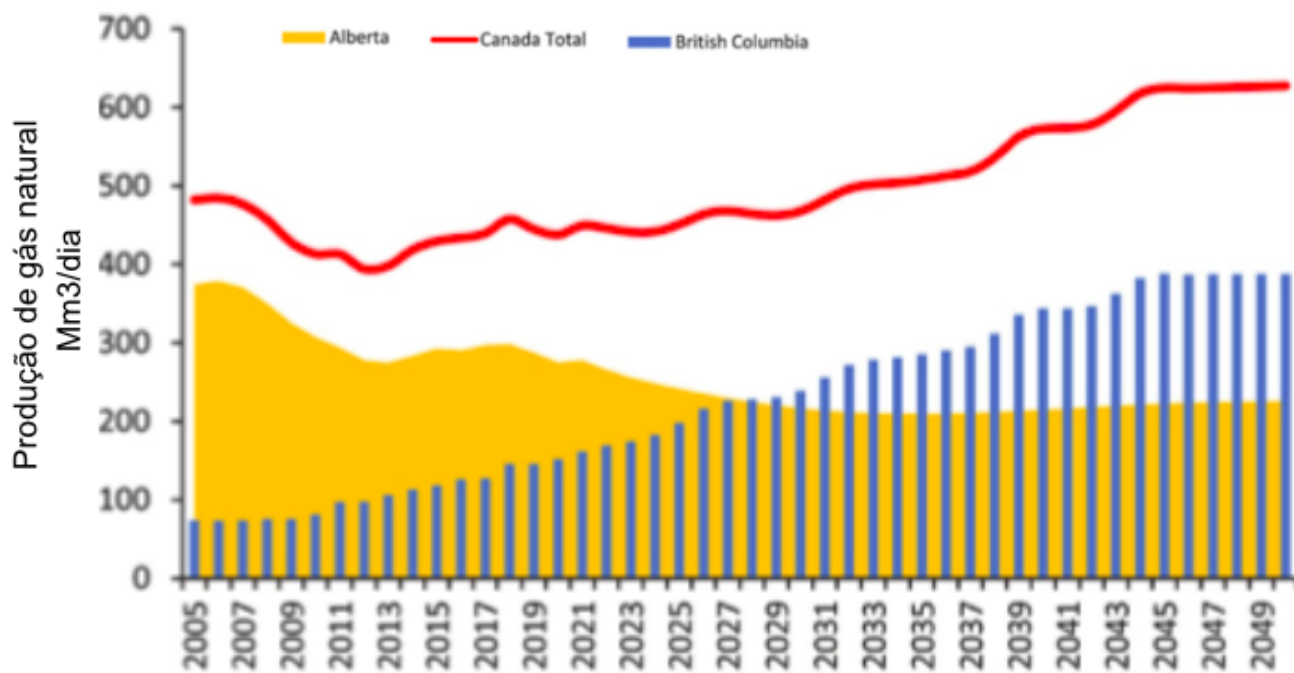
3.2.3.5. Canadá

A América do Norte tem a maior indústria de NG e é o maior mercado de exportações. Os Estados Unidos e o Canadá ocupam aproximadamente 27% da produção global. O Canadá é o quinto maior produtor e o quarto maior exportador de gás natural do mundo. A indústria de gás natural (GN) tem uma influência significativa na saúde econômica do Canadá, contribuindo para o Produto Interno Bruto (PIB), a geração de empregos, além do pagamento de impostos e royalties para os governos provinciais e federais (Ge *et al*, 2020).

Além disso, de acordo com o Governo do Canadá, os recursos de gás natural disponíveis no país são suficientes para sustentar o nível de produção atual por até 300 anos. O relatório *Energy Future* do Canadá, prevê um aumento de mais de 30% no uso

de gás natural até 2040. Mesmo com as atuais políticas de redução de emissões, a produção comercializável de gás natural no Canadá é esperada para aumentar, conforme indicado na Figura 6. Portanto, é prevista uma demanda mais resiliente por gás natural nos próximos anos (Kotagodahetti *et al.*, 2023).

Figura 6: revisão de produção de gás natural comercializável no Canadá com as atuais políticas de redução de emissões



Fonte: Adaptado de Kotagodahetti *et al.*, 2023

4. GÁS NATURAL

4.1. CARACTERÍSTICAS DO GÁS NATURAL

O gás natural é uma mistura de hidrocarbonetos leves, composta principalmente por metano. Apresenta também, compostos diluentes, como o nitrogênio e o vapor d'água, e contaminantes como o gás sulfídrico e o dióxido de carbono. Normalmente, o teor de hidrocarbonetos representa no mínimo 90% da mistura, e os outros 10% diluídos entre os diluentes e os contaminantes. A Tabela 1 apresenta uma típica composição do gás natural encontrado (Brasil *et al.*, 2011).

Tabela 1: Composição molar típica do gás natural

| | |
|---------------------|--------|
| Metano | 82,54 |
| Etano | 10,36 |
| Propano | 2,96 |
| Isobutano | 0,75 |
| N-butano | 0,76 |
| Isopentano | 0,26 |
| N-pentano | 0,27 |
| C ₆₊ (*) | 0,19 |
| Nitrogênio | 1,42 |
| Dióxido de carbono | 0,49 |
| Hélio | traços |
| Argônio | traços |

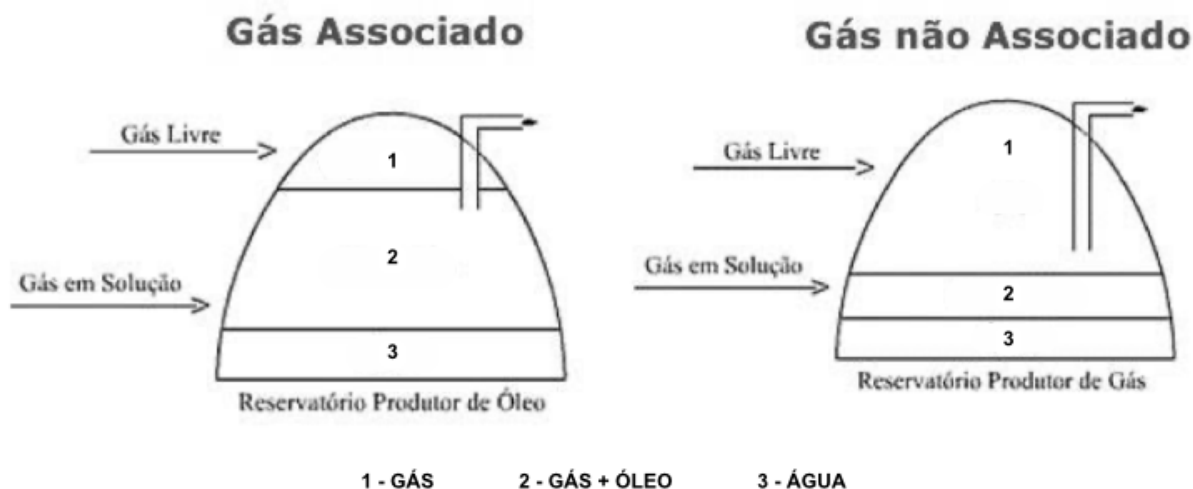
Fonte: BRASIL (2011).

A composição do gás natural pode variar de um reservatório para outro, dependendo do tipo de matéria orgânica que o originou, das condições de temperatura e pressão às quais foi submetido, do tempo de formação, da geologia do solo, do tipo de rocha e da presença de óleo, entre outros fatores. Quanto maior for a presença de componentes mais pesados na mistura, maior será o seu poder calorífico. Os gases com

uma concentração de hidrocarbonetos mais pesados superior a 8,0% são classificados como gases ricos, enquanto aqueles com uma concentração menor que 6,0% são considerados gases pobres (Almeida; Colomer, 2013).

O gás natural ocorre na natureza, associado ou não ao petróleo. O gás natural associado é aquele encontrado em reservatórios produtores de petróleo, podendo estar dissolvido no óleo ou em estado livre formando uma camada de gás. Já o gás não-associado provém de reservatórios produtores de gás, com pequenas quantidades de óleo presentes. A exploração de reservatórios de gás natural não associados tem se tornado cada vez mais importante, especialmente com os avanços tecnológicos em técnicas de extração de gás de rochas não convencionais. Podem ser encontrados em reservatórios independentes, como depósitos de xisto, arenito, calcário e outras rochas sedimentares (Brasil, 2011). A Figura 7 ilustra os esquemas de ambas as ocorrências de gás.

Figura 7: Tipos de gás: Gás Associado e Gás Não Associado



Fonte: Adaptado de Ohwoka *et al.*, 2012

4.2. MERCADO DO GÁS NATURAL

A demanda global por gás natural tem sido crescente devido à sua abundância, menor emissão de dióxido de carbono em comparação com outros combustíveis fósseis e flexibilidade de uso. Setores como geração de energia elétrica, indústria e transporte utilizam gás natural como fonte de energia e matéria-prima. Países em desenvolvimento, especialmente na Ásia, têm impulsionado a demanda, enquanto economias maduras também mantêm a necessidade do gás como backup para fontes intermitentes de energia. Como já exposto, o gás natural pode ser utilizado como uma alternativa para apoiar as energias renováveis durante a transição energética. Vários países estão apoiando suas indústrias de gás para acompanhar a transição energética. Muitos especialistas em energia europeus acreditam que as energias renováveis podem suprir cerca de 60% da demanda global total de energia até 2050 e, portanto, é possível esperar que a demanda por gás natural aumente rapidamente no futuro (REN21, 2017). No entanto, as reservas comprovadas de gás natural correspondem a apenas 15,9% das reservas de combustíveis fósseis, enquanto o carvão representa 60% e o petróleo 24,1% (BP, 2021).

Nos últimos anos, o setor de gás natural (GN) tem vivenciado uma notável expansão global. Conforme indicado pela ANP (2020), os Estados Unidos e a China foram os países que mais registraram aumento no consumo de GN, totalizando um aumento de 26,7 bilhões de m³ (equivalente a 3,2%) e 24,3 bilhões de m³ (equivalente a 8,6%), respectivamente. Contrapondo essa tendência, a Rússia experimentou uma acentuada diminuição, correspondendo a 10,2 bilhões de m³ (equivalente a 2,2%). No ranking dos principais consumidores de GN, os Estados Unidos continuaram liderando a lista, com um volume de 846,6 bilhões de m³ (representando 21,5% do total global), seguidos pela Rússia, com 444,3 bilhões de m³ (equivalente a 11,3% do total mundial), e pela China, com 307,3 bilhões de m³ (correspondente a 7,8% do total global) (Freitas *et al.*, 2021).

Essa expansão notável do setor de gás natural também está fortemente relacionada às reservas mundiais dessa importante fonte de energia. As reservas de gás natural são vastas e distribuídas em diferentes partes do mundo, desempenhando um

papel significativo no suprimento global de energia. Segundo dados da Organização dos países produtores de petróleo em 2023, as reservas mundiais de gás natural totalizaram aproximadamente 210 trilhões de metros cúbicos. Essa abundância de reservas coloca o gás natural em uma posição estratégica para atender à crescente demanda energética de nações em todo o mundo. Enquanto os Estados Unidos e a China lideram o aumento do consumo de gás natural, é importante observar que muitos países estão buscando diversificar suas fontes de energia e reduzir a dependência de combustíveis fósseis, como parte de seus esforços para enfrentar os desafios das mudanças climáticas, o que reforça o potencial de demanda do gás natural como fonte de transição.

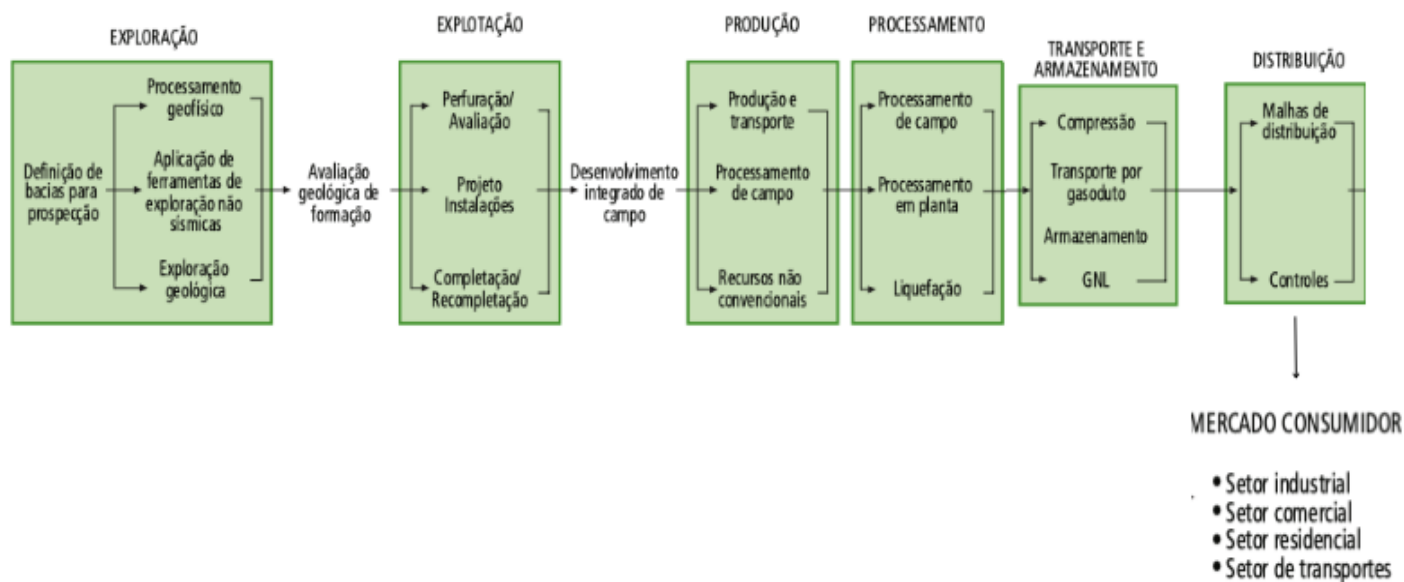
Apesar dos Estados Unidos e da Rússia estarem entre os maiores consumidores globais de gás natural, é importante destacar que esses países não detêm as maiores reservas desse recurso. Enquanto possuem um consumo significativo devido às suas economias desenvolvidas e indústrias robustas, outras regiões, como o Oriente Médio, com 39,2% das reservas comprovadas, abrigam as maiores reservas de gás natural do mundo (OPEC, 2022). Isso ressalta a complexidade das dinâmicas entre consumo e reservas, com o suprimento muitas vezes originando-se em locais distantes dos principais mercados consumidores.

Essa interação entre consumo e reservas de gás natural também tem implicações políticas significativas. Embora os Estados Unidos e a Rússia possam não ser os maiores detentores de reservas, sua posição como principais consumidores lhes confere influência considerável nos mercados globais de energia e nas relações geopolíticas. Esses países muitas vezes buscam diversificar suas fontes de suprimento de gás natural para garantir a segurança energética e reduzir a dependência de regiões específicas. Isso pode levar a acordos comerciais, alianças estratégicas e negociações políticas complexas com os países produtores de gás natural ou, de uma visão oposta, gerar conflitos envolvendo os países produtores. As questões políticas, como sanções internacionais ou conflitos regionais, podem afetar o acesso a essas reservas e influenciar os fluxos de gás natural nos mercados internacionais.

4.3. CADEIA PRODUTIVA DO GÁS NATURAL

De uma maneira geral, a cadeia de suprimento do gás natural pode ser dividida em 3 grandes grupos: "upstream", "midstream" e "downstream". A fase "upstream" é a fase inicial, que envolve os processos de exploração, exploração e produção. A fase intermediária "midstream", engloba os processos de processamento e transporte do gás, em que as empresas são responsáveis por gerenciar as plantas de processamento, instalações de armazenamentos e os oleodutos. Por fim, o "downstream" envolve a fase final de distribuição e consumo do gás (Kotagodahetti *et al.*, 2023). A Figura 8 esquematiza os diversos elos da cadeia produtiva de gás natural desde sua obtenção e processamento até o momento de disponibilização ao consumidor final.

Figura 8: Representação esquemática da cadeia produtiva da indústria de gás natural



Fonte: Adaptado de PNE, 2007

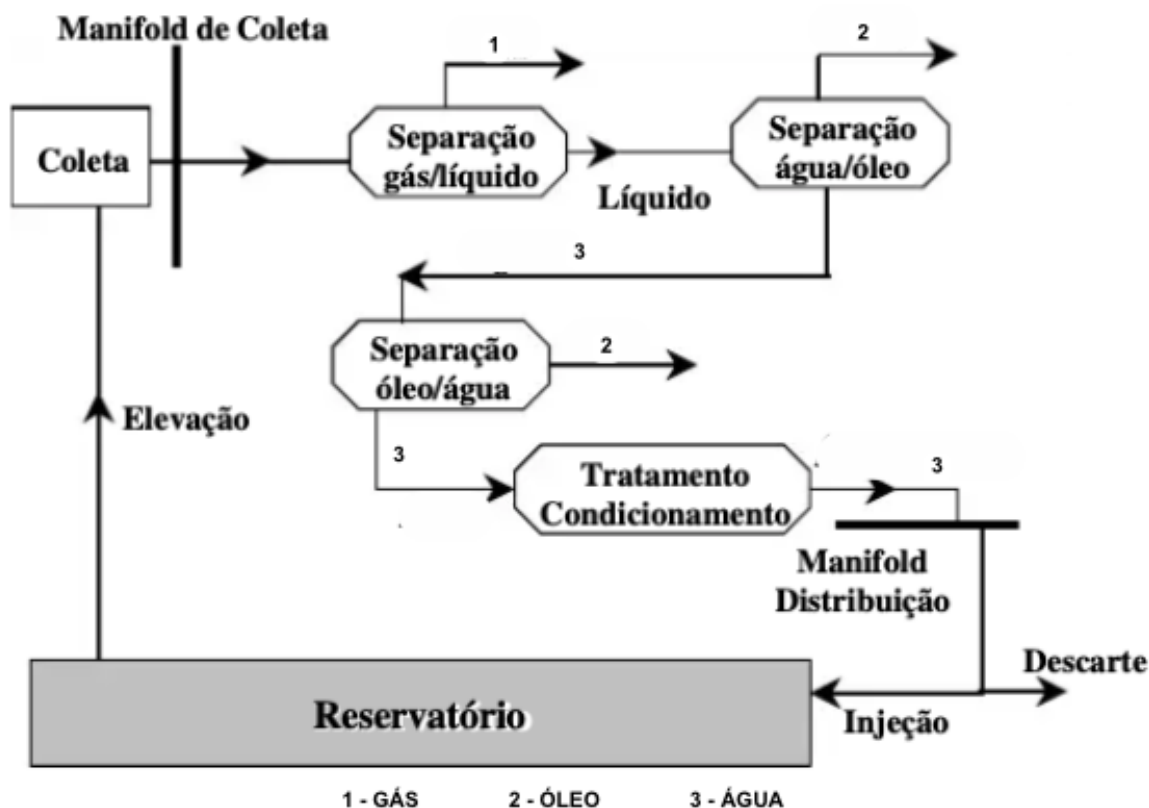
4.3.1. *Upstream*

A primeira fase da cadeia de produção do gás natural é a exploração da matéria prima. Ela envolve todo o conjunto de atividades relacionadas à determinação da existência ou não de reservas, considerando as características geológicas propícias para a criação de reservas. Essa fase demanda um alto investimento e apresenta um risco relacionado à prospecção, e é quando são realizados os estudos de viabilidade técnica e comercial do desenvolvimento dos poços.

Após a fase de avaliação geológica, tem-se a fase da exploração, que compreende o grupo de atividades relacionadas ao projeto das instalações necessárias à exploração do poço. Essa é a fase onde são realizadas as perfurações para a extração do gás e do óleo retido nas reservas, que podem ser classificadas em perfuração vertical, direcional ou horizontal.

A produção, última fase do "*upstream*", envolve o processamento primário, com o objetivo de separação da fase gasosa da água e do óleo, e a redução do teor de vapor de impurezas do gás. A Figura 9 representa as principais etapas do processamento primário que ocorre nas instalações de produção, que podem estar localizadas no mar ou na terra. Esse sistema pode ser projetado para um tratamento mais simples, onde ocorre apenas a separação gás/óleo/água, ou mais complexo, envolvendo o tratamento e estabilização do óleo, condicionamento e compressão do gás, tratamento da água oleosa, além do tratamento de água para injeção no reservatório e descarte (Silva *et al.*, 2007).

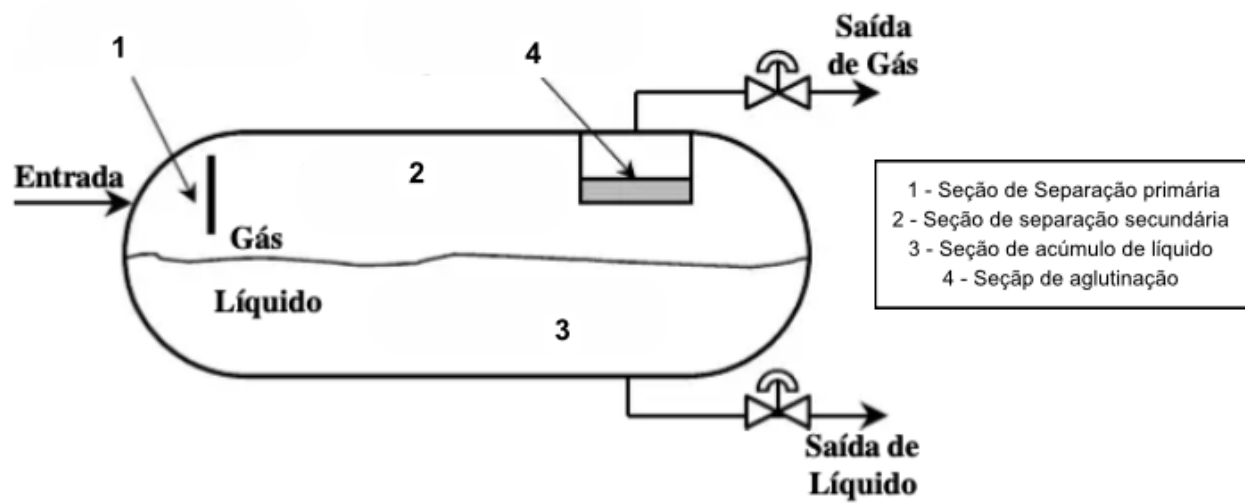
Figura 9: Principais etapas do processamento primário em uma instalação de produção



Fonte: Adaptado de Silva *et al.*, 2007.

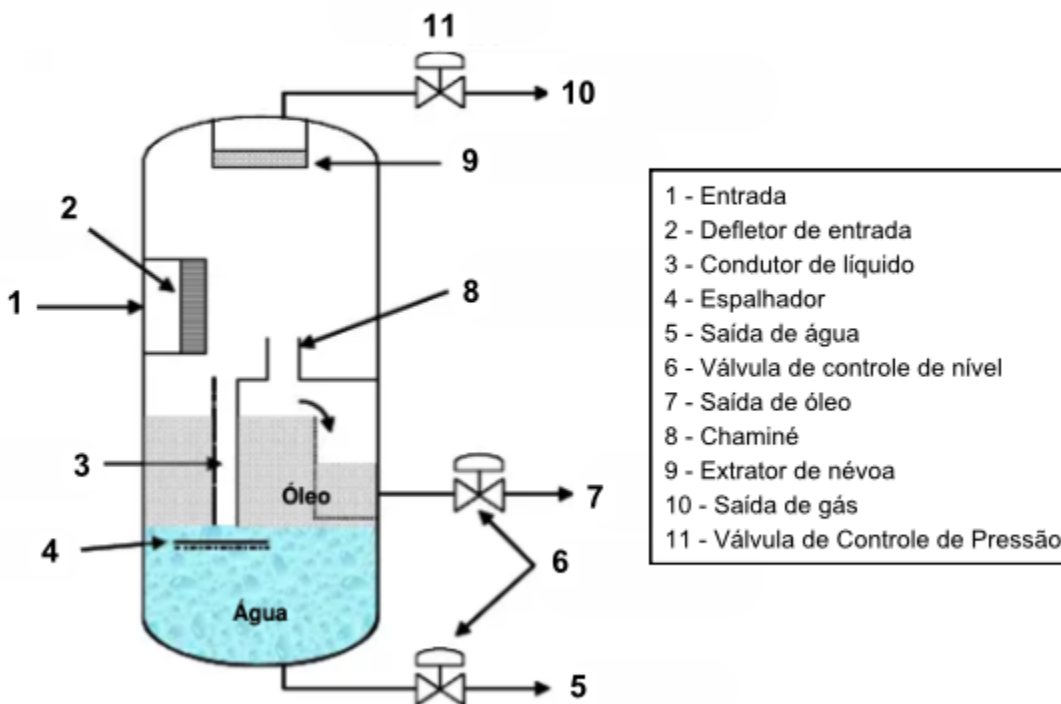
No processamento primário, gás é separado inicialmente pela ação da gravidade, em separadores, por ser menos denso. Esse equipamento, dotado de vários dispositivos internos para aumentar a eficiência da separação, pode ser fabricado na forma horizontal e vertical, representados nas Figuras 10 e 11, respectivamente. Os separadores podem ser ainda bifásicos, quando promovem a separação gás/líquido, ou trifásicos, quando separam gás, óleo e água (Silva *et al.*, 2007).

Figura 10: Separador bifásico horizontal



Fonte: Adaptado de Silva *et al.*, 2007.

Figura 11: Separador trifásico vertical



Fonte: Adaptado de Silva *et al.*, 2007.

4.3.2. Midstream

A classificação *Midstream* corresponde a todas as etapas que estão entre a produção e o consumo do gás natural, englobando o seu processamento e transporte. Após o processo de processamento primário, o gás é enviado a uma unidade de processamento de gás natural (UPGN), onde ocorre o processo de separação das frações mais leves do gás natural das frações mais pesadas, condensáveis (LGN, Líquido de Gás natural), de maior valor econômico. Normalmente são extraídos do gás úmido o propano e o butano, compondo o Gás Liquefeito de Petróleo (GLP), e a gasolina natural (C₅+), que será misturada a outros hidrocarbonetos na refinaria.

De maneira resumida, o processamento do gás natural envolve a redução da temperatura e/ou o aumento da pressão para promover a condensação dos compostos

mais pesados. Dependendo de diversos fatores, como a composição do gás, pressão disponível e metas de recuperação, podem ser utilizados os seguintes processos:

- Refrigeração simples: Reduz a temperatura para a condensação dos hidrocarbonetos mais pesados, usando um fluido refrigerante em circuito fechado.
- Absorção refrigerada: O gás entra em contato com um fluido auxiliar (óleo de absorção) em uma torre de alta pressão e baixa temperatura, alcançada por meio de um fluido refrigerante, geralmente propano, em circuito fechado.
- Turbo-expansão: O gás é expandido através de uma turbina, resultando em resfriamento e condensação dos hidrocarbonetos mais pesados. É possível que seja necessário o uso de um fluido refrigerante (turbo-expansão refrigerada).
- Expansão Joule-Thompson (JT): A expansão do gás em uma válvula causa a redução de pressão e, conseqüentemente, resfriamento. É possível aplicar refrigeração adicional.

As recuperações de líquidos que podem ser alcançadas dependem do tipo de processo utilizado e da riqueza do gás. É comum se recuperar 100% de butanos e hidrocarbonetos mais pesados, 90 a 95% de propano e até cerca de 80% de etano, em porcentagens molares (Thomas, 2001).

O transporte do gás natural após ser processado pode se dar através de três modais a saber: por gasodutos, Gás Natural Liquefeito (GNL) ou Gás Natural Comprimido (GNC). A escolha do modal de transporte dependerá tanto de aspectos técnicos quanto econômicos, sendo função principalmente do volume a ser transportado e da distância do destino em relação à origem do gás (Almeida; Colomer, 2013).

O transporte de gás natural por meio de gasodutos é a opção mais frequente, sendo geralmente a alternativa mais econômica para transportar grandes volumes de gás em fornecimento contínuo. Além do transporte principal, os gasodutos também têm uma aplicação secundária como sistema de armazenamento de gás natural, já que retêm uma parte do gás transportado. A economia de um gasoduto depende significativamente

de fatores como o volume de gás disponível (que determina o diâmetro da tubulação), o número de estações de recompressão utilizadas e o terreno pelo qual o gasoduto passa. Os custos operacionais variam consideravelmente, dependendo do número de estações de recompressão, dos custos de mão-de-obra e do nível de utilização do gasoduto (Cornot-Gandolphet *et al*, 2003). O modal de transporte GNL envolve a liquefação do gás natural a -160 0C, o que permite a redução em até 1/600 do volume inicial à temperatura ambiente. Em linhas gerais, esta forma de transporte é adotada em ocasiões onde o transporte por gasodutos encontra dificuldades na sua construção tais como: necessidade de travessias em oceanos e mares profundos, regiões montanhosas, restrições ambientais severas ao traçado do gasoduto, distâncias muito elevadas de transporte aos centros consumidores bem como mercados de pequena escala (EPE, 2007). Já os processos GTL baseiam-se na conversão do gás natural em derivados líquidos combustíveis a partir de processos químicos que envolvem reforma a vapor, oxidação parcial e a síntese de Fischer-Tropsch, obtendo como produtos, principalmente, nafta e óleo diesel.

4.3.3. Downstream

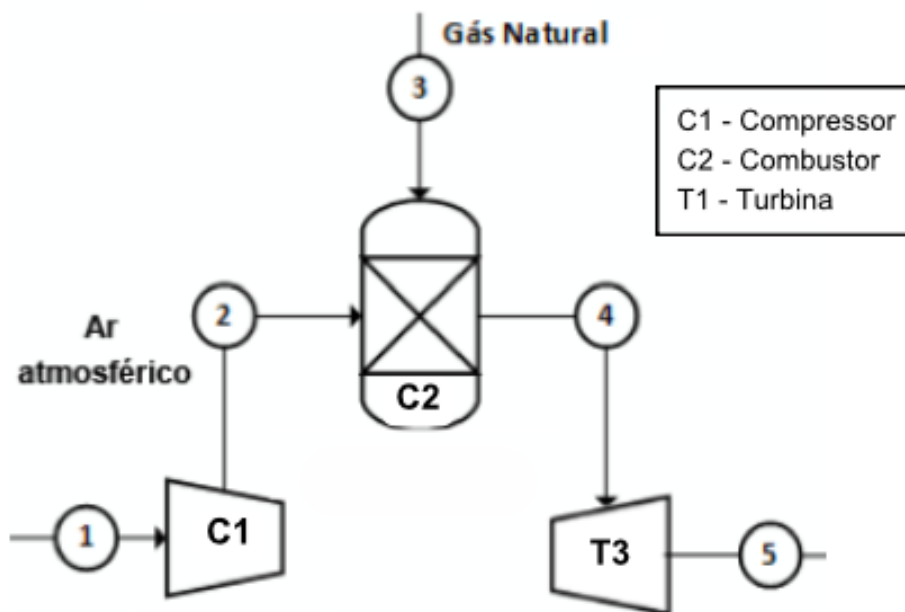
A fase final da cadeia do gás natural, conhecida como "*downstream*" ou distribuição, corresponde à entrega do gás natural para o seu uso final. Normalmente, essa distribuição é realizada por meio de gasodutos. A distinção entre os gasodutos de transporte e distribuição reside no tamanho das tubulações e na pressão de operação. Os gasodutos de transporte têm maior diâmetro e operam sob maior pressão (em média, 80 bar), enquanto os gasodutos de distribuição possuem menor diâmetro e pressão (menor que 20 bar). A redução da pressão ocorre nos *city-gates*, pontos de conexão entre os gasodutos de transporte e os de distribuição, onde também ocorre a filtragem do gás natural.

4.4. A GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DO GÁS NATURAL

4.4.1. Termelétricas de ciclo simples

A geração de energia em termelétricas de ciclo simples se baseia no ciclo Brayton. O processo tem início com a compressão do ar atmosférico por meio de um compressor. Depois disso, o ar comprimido é direcionado para uma câmara de combustão, onde ocorre a mistura com o combustível e, em seguida, a combustão. O ar, agora em alta pressão e temperatura, é expandido e passa por uma turbina, fazendo-a girar. A turbina e o compressor estão conectados no mesmo eixo, permitindo que a compressão do ar seja impulsionada pelo movimento da turbina. No mesmo eixo, um gerador é acoplado, convertendo a energia mecânica resultante em energia elétrica (Soares, 2023). A Figura 12 representa o fluxograma do ciclo Brayton.

Figura 12: Fluxograma de uma turbina a gás ciclo simples



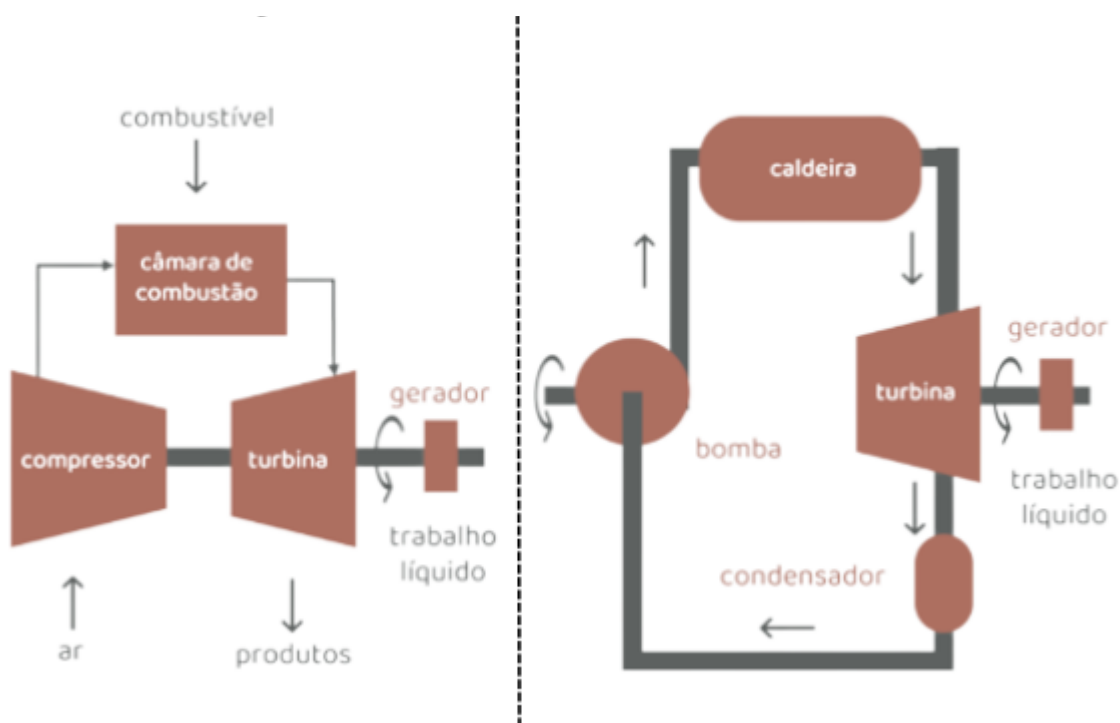
Fonte: Adaptado de Almeida *et al.*, 2020.

4.4.2. Termoelétricas de ciclo combinado

O princípio do funcionamento das usinas termoelétricas de ciclo combinado é a utilização conjunta dos ciclos Brayton e Rankine, e consiste na utilização de turbinas a gás e a vapor, de modo que a energia térmica contida na descarga em alta temperatura dos gases na turbina a gás seja aproveitada para a geração de vapor. O ciclo de Rankine é um ciclo fechado que utiliza a água como fluido de trabalho, diferente dos outros ciclos que utilizam combustível. Nele, primeiramente a água é bombeada para uma caldeira, que é aquecida até virar vapor. O vapor, por sua vez, expande passando por uma turbina e, após perder temperatura e pressão na expansão, passa por um condensador, onde retorna ao estado líquido. A mudança de estado da água ocorre por 2 grandes motivos: é mais fácil bombear água no estado líquido do que gasoso e, além disso, a turbina tem maior rendimento e vida útil quando se utiliza gás (vapor). O processo de condensação

no ciclo Rankine normalmente demanda grande quantidade de água, pois depende da troca de calor entre água corrente (fria) e a água do ciclo (quente) para sua condensação. Quando o suprimento de água é limitado, uma torre de resfriamento pode ser empregada. Entretanto, o lançamento de água morna ou quente pode resultar em poluição térmica nos corpos d'água, portanto, é necessário seguir as diretrizes ambientais locais (Soares, 2023). A Figura 13 representa um esquema do ciclo combinado, sendo a primeira parte uma representação do ciclo Brayton e a segunda parte, o ciclo Rankine.

Figura 13: Fluxograma simplificado de uma termoelétrica de ciclo combinado



Fonte: Adaptado de Soares (2023).

Segundo Kotowicz e Brzeczek (2018) e Kwon *et al.* (2019), a eficiência do ciclo combinado de um empreendimento padrão opera entre a faixa de 40 a 65% conforme tecnologia adotada. É possível realizar melhorias no ciclo para aumentar sua eficiência,

tais como: compressão ou expansão em múltiplos estágios, aquecimento da água entre os estágios de compressão, entre outras medidas.

4.4.3. Adaptação da Infraestrutura de termelétricas

Em todo o contexto já demonstrado, é claro que a geração de energia precisa ser reformulada, porém, para a redução das emissões em curto prazo, não é viável reconstruir o sistema de energia do zero. Assim, é importante reutilizar o máximo possível da estrutura já existente para permitir uma transição energética rápida, de uma forma que não comprometa a redução das emissões de CO₂. Uma adaptação significativa no contexto atual é a conversão das usinas de carvão já existentes em usinas de ciclo combinado, com uma alta eficiência. Essa adaptação é uma saída que permite uma maior flexibilidade operacional, sendo uma aliada na crescente utilização de fontes renováveis. Ao converter uma usina ao funcionamento com gás natural, a nova estrutura permite a operação também com o hidrogênio, uma fonte potencial para o cenário pós transição energética.

Em comparação com projetos de construção de plantas do zero, pode apresentar custos de investimento mais baixos, permissões reduzidas, tempo de implementação mais curto e reutilização de conexões de rede existentes e outras infraestruturas físicas e sociais já em vigor. Além disso, essas transformações de adaptação são projetadas para incorporar tecnologias, como armazenamento de energia, conversão de energia ou captura de carbono, todas destinadas a ajudar a alcançar zero emissões de carbono ao final da jornada de transformação (Siemens Energy, 2022).

Para seguir com uma solução que seja viável tecnologicamente e financeiramente, é preciso compreender o plano de desenvolvimento considerando fatores políticos, regulatórios, econômicos, bem como as metas de curto prazo em comparação com as metas de longo prazo. Além disso, é importante definir os perfis de consumo de calor e eletricidade, assim como futuras conexões com o ambiente industrial, como opções futuras de utilização de hidrogênio ou biogás.

Com relação ao ambiente interno já existente, é possível reutilizar grande parte da infraestrutura, como fundações, conexões, estruturas e tubulações, o que economiza tempo e recursos financeiros. Já no ambiente externo, é possível iniciar a construção em

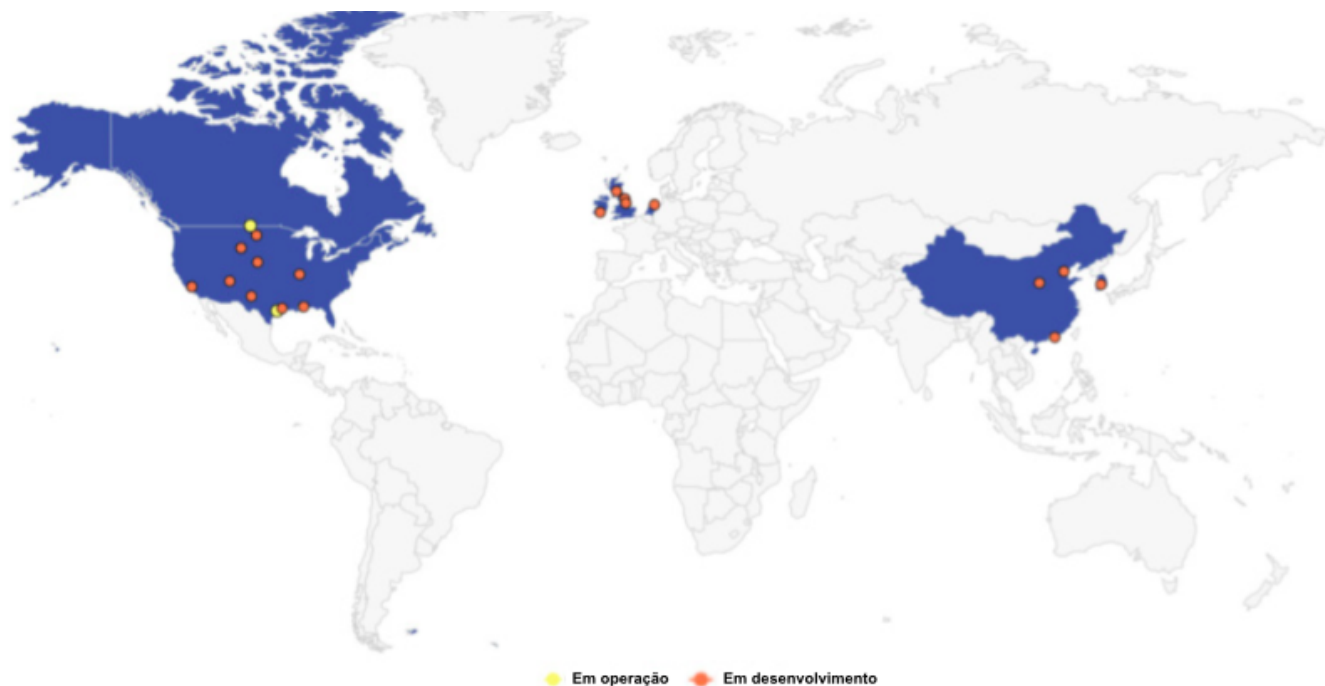
paralelo enquanto a planta existente ainda está em funcionamento para garantir o fornecimento crítico, da mesma forma que pode-se construir unidades de CCUS integradas à planta. No processo, além da substituição das turbinas e caldeiras para o funcionamento com gás e a adaptação da alimentação da planta, é importante analisar o espaço físico disponível e a condição de operação dos equipamentos já existentes (Siemens Energy, 2022).

4.5. CAPTURA, UTILIZAÇÃO E ARMAZENAMENTO DE CARBONO (CCUS)

O uso do gás natural é diversificado e, comparativamente, é um combustível fóssil mais limpo. No entanto, as operações da indústria de GN emitem níveis substanciais de gases de efeito estufa. Portanto, é necessário implementar estratégias que visem evitar essas emissões industriais. Para alcançar um sistema de energia que busca a descarbonização, equipar as usinas de gás natural com a captura, utilização e armazenamento do carbono (CCUS) pode ser uma opção viável. Esse sistema pode mitigar as emissões de CO₂ de usinas de gás natural existentes por meio de modernização e também pode fornecer emissões negativas de CO₂ se combinadas com bioenergia.

Existe um consenso crescente sobre o papel do CCUS em um mundo de baixo carbono, o que aumentou o incentivo para o desenvolvimento do CCUS. Cerca de 40 projetos de usinas de energia com CCUS estão em diferentes estágios de desenvolvimento ao redor do mundo. Aproximadamente um quarto deles está nos Estados Unidos, outro quarto no Reino Unido, e o restante em outros países europeus (Dinamarca, Holanda, Noruega e Dinamarca) e na China. Cerca de 30% desses projetos estão relacionados à geração de energia a gás natural (Bugaje, *et al.*, 2022). A Figura 14 apresenta os projetos de energia com CCUS em desenvolvimento.

Figura 14: Projetos de Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono na geração de energia (operação e em desenvolvimento).



Fonte: Adaptado de Bugaje *et al* (2022).

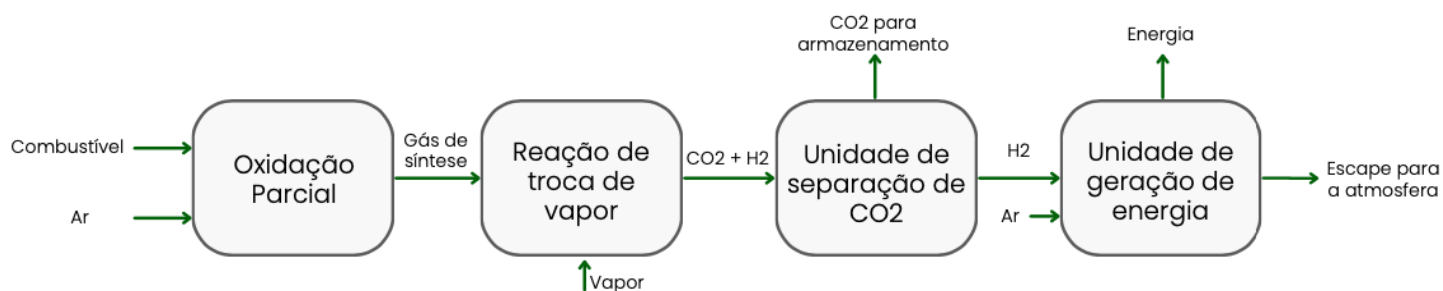
CCUS se refere a um conjunto de tecnologias envolvendo a captura de CO₂ de fontes de alta emissão e do ar, o transporte do CO₂ da fonte ao local de armazenamento ou reutilização, e o armazenamento permanente do CO₂ capturado. Geralmente, as tecnologias de captura de CO₂ incluem captura pré-combustão, captura pós-combustão e combustão com oxigênio (oxy-fuel) (Bode *et al.*, 2008). Dentre essas três tecnologias, a captura pré-combustão apresenta uma maior eficiência e menores custos, sendo amplamente empregada em usinas de ciclo combinado de gaseificação integrada (IGCC) para geração de eletricidade. A combustão com oxigênio envolve a queima de combustível em oxigênio puro, permitindo a extração direta do CO₂ do vapor d'água condensado. Já a captura pós-combustão, é a tecnologia mais comumente utilizada, com alta seletividade e taxa de captura (Benson *et al.*, 2008).

4.5.1. Captura de CO₂ pré combustão

O processo de captura de carbono pré combustão é baseado principalmente no tratamento do gás de síntese (syngas). Nesse processo, o gás natural é parcialmente queimado com quantidade subestequiométrica de oxigênio para produzir o syngas, predominantemente contendo monóxido de carbono e hidrogênio. Em seguida, o vapor é adicionado ao syngas e a reação de deslocamento do gás da água ocorre em um leito repleto de catalisadores, convertendo o CO em CO₂ e aumentando o rendimento de H₂.

O CO₂ resultante é separado do H₂ e enviado para compressão, enquanto o H₂ puro é usado para gerar eletricidade em um ciclo combinado ou alimentar células de combustível para aumentar a eficiência geral da planta. Outra opção é utilizar o H₂ como combustível de transporte. O processo de separação geralmente utiliza solventes físicos, como rectisol e selexol, que são de baixo custo e requerem pouca energia para regeneração (Mondal *et al.*, 2012). A Figura 15 representa o processo para captura do CO₂ pré combustão.

Figura 15: Processo para captura do CO₂ pré combustão

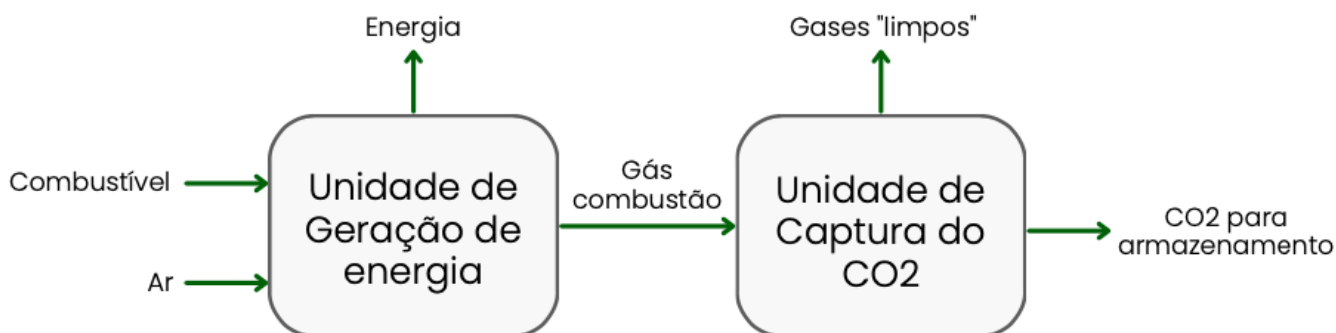


Fonte: Adaptado de Mondal *et al.* (2012).

A captura pré-combustão apresenta a vantagem de tornar a captura de CO₂ menos cara em comparação com a captura pós-combustão, devido à maior concentração de CO₂ no gás de síntese. No entanto, a principal desvantagem é a necessidade de uma planta química na frente da turbina, o que pode levar a desligamentos extras da usina e resultar em menor potência. Outras desvantagens são os estoques de alimentação não gasosa, a exigência do fluxo de gás limpo e a possível lavagem cara para controle de altas emissões de NO_x. Além disso, existem poucas usinas de gaseificação em operação em grande escala.

4.5.2. Captura de CO₂ pós combustão

A captura de carbono pós-combustão em uma usina de gás natural envolve a remoção de CO₂ do gás produzido na câmara de combustão da usina termelétrica. Essas usinas geralmente operam com gás de combustão à pressão atmosférica e concentrações de gás carbônico inferiores a 15%. A baixa concentração de CO₂ representa um desafio técnico para o desenvolvimento de processos de captura econômicos, pois é necessária uma grande quantidade de gás para ser manuseado, resultando em equipamentos volumosos e altos custos de capital (Figuerola *et al.*, 2008). As tecnologias baseadas em absorção química são mais adequadas para essa separação, enquanto outras técnicas, como adsorção, membranas e criogênica, são menos apropriadas para a captura pós-combustão devido a fatores como a menor pressão parcial de CO₂ nos gases de escape, a presença de poeiras, impurezas e gases não condensáveis (Mondal *et al.*, 2012). A Figura 16 representa o fluxo do processo de captura de CO₂ pós combustão.

Figura 16: Processo de captura de CO₂ pós combustão

Fonte: Adaptado de Mondal *et al.* (2012).

Apesar dos desafios, a tecnologia de captura pós-combustão apresenta uma eficiência térmica maior na conversão em eletricidade do que o processo de captura pré combustão em ciclos combinados. Segundo Yang (2008), estima-se que essa opção possa proporcionar custos totais de eletricidade mais baixos do que a captura pré-combustão para usinas de gás natural.

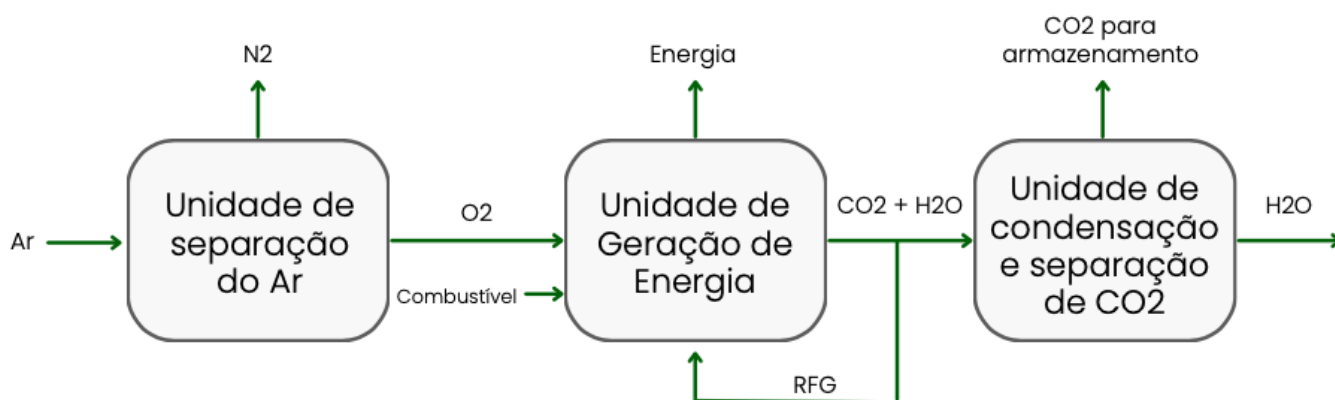
A separação do CO₂ do fluxo de gases de combustão no processo de pós-combustão é complexa devido à temperatura relativamente alta dos gases de combustão. Além disso, a baixa concentração de CO₂ requer o uso de solventes químicos eficientes, cuja regeneração para liberar o CO₂ exige uma quantidade significativa de energia (Mondal *et al.*, 2012).

4.5.3. Combustão com oxigênio (Oxi-fuel)

No processo de captura de carbono da combustão de oxi-combustível, representado na Figura 17, o combustível é queimado em uma câmara de combustão com oxigênio puro (geralmente > 95%) misturado com gás de combustão reciclado

(RFG). O oxigênio de alta pureza é obtido através de uma unidade de separação de ar criogênica, que é misturado com RFG antes da combustão para manter condições similares às configurações de combustão convencionais. O fluxo de gás de combustão resultante contém principalmente CO_2 e vapor de água, sendo que a água é facilmente removida por condensação, e o CO_2 restante pode ser purificado a baixo custo (Mondal *et al.*, 2012). A concentração de CO_2 no gás de combustão seco varia de 70% a 95%, dependendo do combustível, do processo usado e das condições operacionais. A combustão de oxi-combustível apresenta um custo de captura de carbono menor em comparação com métodos convencionais, devido à redução no volume de gases de combustão e ao aumento da concentração de CO_2 . Além disso, a utilização de oxigênio puro resulta em uma significativa redução das emissões de NO_x em até 60% a 70% quando comparada à combustão com ar (Blomen *et al.*, 2009).

Figura 17: Princípio da captura de CO_2 da combustão de oxicombustível



Fonte: Adaptado de Mondal *et al.* (2012).

Uma vantagem adicional é a possibilidade de operar a usina a alta pressão, o que reduz a energia necessária para compressão do CO_2 . Entretanto, a tecnologia de captura de carbono oxi-combustível possui algumas limitações, como o alto consumo de energia auxiliar pela unidade de separação de ar criogênico, o requisito de materiais de

construção capazes de suportar altas temperaturas e o aumento do custo do processo devido à reciclagem dos gases de combustão (Mondal *et al.*, 2012).

Apesar dos desafios, a captura de carbono oxi-combustível representa uma solução promissora para reduzir as emissões de CO₂ em usinas de geração de energia a partir do gás natural, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas. A tecnologia oferece uma abordagem eficiente e menos poluente em comparação com outras alternativas convencionais

5. FONTES POTENCIAIS A LONGO PRAZO: HIDROGÊNIO E BIOGÁS

Como exposto, o uso do gás natural como combustível complementar às energias renováveis deve ser considerado como uma solução provisória, principalmente por ser um combustível fóssil e não ser considerado um combustível de baixo carbono. Além da emissão de gases do efeito estufa diretamente pela combustão, toda a cadeia do gás natural apresenta consideráveis níveis de emissão. Dessa forma, é importante ressaltar a importância do desenvolvimento das fontes de energia renováveis e de baixo carbono. A geração de energia solar e eólica ocupam um grande espaço na matriz energética atual, porém, em um cenário ideal de geração de baixo carbono, a sazonalidade dessas fontes representa um risco no equilíbrio do *"trilemma energy"*, por influenciar na segurança do sistema de geração de energia. Dessa forma, outras fontes de energia que apresentam um grande potencial de geração estão em fase de desenvolvimento, como o biogás e o hidrogênio.

5.1. BIOGÁS

A geração de energia a partir de biogás tem surgido como uma promissora alternativa no cenário energético global, alinhando-se com os esforços para a transição para fontes mais sustentáveis e de baixa emissão de carbono. O biogás, uma forma de energia renovável obtida a partir da decomposição anaeróbica da matéria orgânica, oferece, além da oportunidade de produzir eletricidade e calor, uma alternativa para os resíduos orgânicos e reduzir as emissões de gases de efeito estufa. À medida que a busca por fontes mais limpas e ambientalmente amigáveis de energia se intensifica, o

biogás emerge como uma fonte potencial, destacando-se por sua versatilidade, sustentabilidade e contribuição para a circularidade da economia.

A produção de biogás faz parte do ciclo global do carbono. Anualmente, a biodegradação natural de matéria orgânica em condições anaeróbicas libera entre 590 milhões e oitocentos milhões de toneladas de metano na atmosfera. Os sistemas de recuperação de biogás exploram esses processos bioquímicos para decompor vários tipos de biomassa, aproveitando o biogás liberado como fonte de energia. A atividade de pelo menos três comunidades bacterianas é necessária nas cadeias bioquímicas que liberam metano (Bond; Templeton, 2011).

O biogás, em particular, difere das fontes de energia eólica ou solar devido à sua capacidade de geração contínua. É possível estocá-lo a custos baixos, seja na forma de matéria-prima, seja como gás comprimido. Além disso, sua estabilidade permite que o biogás desempenhe o papel de regulador para mitigar a intermitência característica das fontes eólica e fotovoltaica. Destaca-se que o biogás tem “pegada negativa de carbono”, pois não somente é de baixa emissão como também mitiga a poluição que seria causada, em caso de não aproveitamento, pelos próprios resíduos que constituem suas fontes de matéria-prima. Assim, o metano que iria para a natureza, poluindo o solo e a atmosfera, se transforma em fonte de energia (Milanez *et al.*, 2018).

5.2. HIDROGÊNIO

O hidrogênio tem ganhado destaque como uma fonte potencial de energia de baixo carbono devido às suas características como um combustível versátil e altamente eficiente, capaz de reduzir significativamente as emissões de carbono em diversos setores. O hidrogênio pode ser produzido de várias formas, podendo ser partir de fontes renováveis, como a eletrólise da água usando energia renovável, ou a partir de fontes não renováveis, como gás natural, com captura de carbono.

Uma das principais vantagens do hidrogênio é a sua capacidade de produzir energia sem a emissão direta de gases de efeito estufa. Quando queimado, o hidrogênio reage com o oxigênio, liberando energia e produzindo apenas água como subproduto. Isso o torna uma alternativa promissora aos combustíveis fósseis, que geram emissões significativas de CO₂.

No entanto, a adoção em larga escala do hidrogênio enfrenta alguns desafios. A produção de hidrogênio a partir de fontes renováveis é atualmente mais cara do que os métodos tradicionais, como a reforma de gás natural. Além disso, a infraestrutura para armazenamento e distribuição de hidrogênio ainda é limitada, o que pode dificultar sua disponibilidade e acessibilidade. Outro desafio é a eficiência energética da produção e uso do hidrogênio. A eletrólise da água, embora seja uma rota de produção limpa, requer grandes quantidades de eletricidade para separar as moléculas de água em hidrogênio e oxigênio. Isso pode resultar em perdas significativas de eficiência se a eletricidade não for gerada de fontes renováveis (IEA, 2019).

Apesar dos desafios, o hidrogênio continua a ser uma opção promissora para a transição para uma economia de baixo carbono. À medida que as tecnologias avançam, os custos de produção podem diminuir e a infraestrutura de armazenamento e distribuição pode ser aprimorada. Investimentos em pesquisa, desenvolvimento e políticas favoráveis são essenciais para acelerar o desenvolvimento e a adoção do hidrogênio como uma fonte de energia viável e sustentável.

6. DISCUSSÃO

Com o considerável aumento da emissão dos gases do efeito estufa, e o impacto cada vez maior na vida humana, a crescente conscientização sobre os impactos das emissões de GEE e a necessidade de mitigar as mudanças climáticas têm impulsionado uma transformação significativa no cenário energético global, visto que a geração de energia é responsável por grande parte da emissão dos GEE atualmente. A matriz energética mundial ainda se mostra extremamente dependente de combustíveis fósseis, os quais são responsáveis pela maior parte das emissões atuais. Com o aumento dos impactos, o tema tem ganhado bastante espaço nas discussões políticas, econômicas e ambientais, em que é clara a pressão mundial para uma revisão dos métodos utilizados para abastecer energeticamente a demanda mundial, de uma forma que o avanço econômico não seja impactado, e que seja alcançado um equilíbrio entre a sustentabilidade, segurança energética e acessibilidade.

Dessa forma, é imprescindível que a transição energética seja colocada como uma das pautas principais entre as maiores economias mundiais, as quais também são as maiores responsáveis por essa geração de energia e, conseqüentemente, pela emissão de gás carbônico para a atmosfera. Porém, em um sistema econômico que, em sua maioria, segue um modelo capitalista, os objetivos ambientais precisam estar alinhados com as necessidades econômicas, para que sejam realmente aplicados na realidade. Estudos como o realizado e publicado pelo conselho mundial de energia, em colaboração com a empresa global de consultoria em gestão Oliver Wyman, "*World Energy Trilemma*", trazem formas de buscar por esse equilíbrio entre as frentes, destacando pontos de conflito e complexidade do tema. Esses estudos podem ser utilizados como base para as discussões da transição energética de uma forma que se encaixe na realidade e não seja presente apenas em estudos científicos, uma vez que a aplicabilidade de instalações e desenvolvimento de infraestruturas estão diretamente relacionados aos custos envolvidos.

Quando se trata de fontes sustentáveis de energia, a princípio, as ideais são as que utilizam recursos disponíveis e não finitos na natureza, como a solar, eólica e hidrelétricas. É realmente indiscutível que, até o momento, são tecnologias limpas e que

seria ideal um cenário onde fosse possível atender a demanda mundial com a sua utilização. Em contrapartida, da mesma forma que são recursos naturais, estes estão suscetíveis a sazonalidade e, a geração de energia provinda apenas dessas fontes traria uma instabilidade em todo o sistema mundial. Assim, é necessário um avanço tecnológico na área que permita o desenvolvimento de fontes de energia que sejam de baixo carbono, mas que ainda sim tragam uma estabilidade maior para o fornecimento de energia.

No entanto, para alcançar as metas mundiais de redução de emissões e mitigar os impactos ambientais que já são enfrentados, não é possível continuar no mesmo cenário de geração de energia até que essas novas fontes sejam desenvolvidas. Assim, a utilização de um combustível fóssil, não renovável, mas que apresenta menores níveis de emissão de gás carbônico e pode ser utilizado em uma infra estrutura já existente, apenas com adaptações, se mostra viável, e o gás natural se coloca como um grande aliado no processo de transição energética. O seu mercado já estabilizado, a grande oferta disponível e a estrutura tanto de produção, quanto de transporte, já existentes, são fatores que se mostraram imprescindíveis para a utilização do gás natural como uma fonte alternativa ao carvão mineral e ao óleo combustível. Os países mais desenvolvidos e maiores emissores, como os Estados Unidos, União Europeia e China, apresentam cenários favoráveis ao uso do gás natural como um substituto nas usinas termoelétricas e tem apresentado incentivos à essa adaptação, como uma das formas de contenção das emissões.

Essa utilização do gás natural como fonte da transição energética pode trazer outras questões como o aumento da sua produção, que envolve um alto nível de emissões em toda a sua cadeia, desde a extração, processamento e transporte. Portanto, para que seja um aliado na redução de emissões, também é importante que sejam adotados métodos mais eficientes de geração, como as termelétricas de ciclo combinado, que apresentam eficiências maiores do que as de ciclo simples. Além disso, é importante também que sejam instalados nas usinas os sistemas de captura, utilização e armazenamento do carbono (CCUS).

No presente texto, foram apresentados três métodos de CCUS: Os métodos pré combustão, pós combustão e a combustão com oxigênio. O processo de pré combustão,

que, de uma forma geral, tem o objetivo de separar o CO₂ antes da combustão, é um método de baixo custo envolvido mas que cria complicações na planta ao necessitar de uma instalação anterior à turbina. O método pós combustão, apresenta uma maior eficiência térmica maior na conversão em eletricidade e, por isso, foi estimado que os custos totais da planta podem ser menores quando comparado ao método pré-combustão. Já o método “Oxi-Fuel”, apesar de apresentar um alto potencial de redução das emissões da planta, esse método ainda enfrenta muitos desafios que tornam a sua utilização dependente de uma infraestrutura que demanda um alto investimento inicial. O método mais comumente utilizado atualmente é o método de pós combustão, visto que ele pode ser incluído nas estruturas mais tradicionais de termelétricas já existentes, o que seria uma boa alternativa considerando o cenário do uso em larga escala de termelétricas apenas como fonte de transição para uma matriz de maioria renovável.

Este trabalho trouxe um detalhamento do gás natural como uma fonte de energia, e é importante ressaltar que o seu uso deve ser considerado em grande escala apenas como uma fonte de transição. No entanto, mesmo em um cenário ideal, ainda existe a possibilidade do uso de um combustível fóssil como garantia para a estabilidade energética, mesmo que em uma escala muito menor. Assim, métodos de CCUS como o “Oxi-fuel” se tornam uma boa alternativa para reduzir a emissão do gás natural em um longo prazo.

7. CONCLUSÃO

Diante de todo o exposto neste trabalho, pode-se concluir que a utilização do gás natural em substituição do carvão mineral e do óleo combustível como uma fonte de energia de transição para uma matriz energética é uma opção viável e pode ser considerado um aliado na busca pela redução das emissões de gases do efeito estufa, mesmo sendo um combustível fóssil e não renovável. A disponibilidade global do gás natural, aliada à infraestrutura existente para extração, transporte e distribuição, o coloca como um importante aliado na jornada rumo a uma matriz energética mais limpa. Seu uso já é incentivado em países de grande emissão, como os Estados Unidos, União Europeia e China, como uma alternativa que pode reduzir de imediato as emissões de GEE.

No entanto, a utilização do gás natural como uma fonte de transição não está isenta de desafios. Aumentar sua produção levanta preocupações sobre a pegada de carbono associada a toda a cadeia, desde a extração até o transporte. Para maximizar sua contribuição na redução das emissões, tecnologias de geração mais eficientes, como as termelétricas de ciclo combinado, e sistemas de captura, utilização e armazenamento de carbono (CCUS) devem ser implantadas.

Por fim, o gás natural assume um papel importante como uma peça chave na transição energética. Sua utilização como fonte de energia intermediária, combinada com a implantação de tecnologias mais limpas e estratégias de redução de emissões, contribuirá para um cenário em que a estabilidade energética se alinhe com a sustentabilidade ambiental.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, E.; COLOMER, M. **Indústria do Gás Natural - Fundamentos Técnicos e Econômicos**. United Nations Climate Change. 2013. Disponível em: <<https://unfccc.int/about-us/about-the-secretariat>>. Acesso em: 18/06/2023.

ALMEIDA, L.N.de; CHAVES, L.A.O; SANTOS, H.M. T. dos. **Análise operacional da eficiência energética de uma usina termelétrica a gás natural**. Rio Oil & Gas Expo and Conference, 2020.

Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/>>. Rio de Janeiro, 2020.

BENSONS, M.S.; ORR, M.F. **Carbon dioxide capture and storage**. MRS Bull, 2008.

BLOMEN, E.; HENDRIKSA, C.; NEELE, F. **Capture technologies: improvements and promising developments**. Energy Procedia, 2009.

BODE, S, JUNG M. **Carbon dioxide capture and storage-Liability for non-permanence under the UNFCCC**. Int Environ Agreements Polit, 2008.

BOND, T.; TEMPLETOM, M.R.; **History and Future of Domestic Biogas Plants in the Developing World**. Energy for Sustainable Development, v15, p347-354. 2011.

BP, 2021. BP **Statistical Review of World Energy 2021**. British Petroleum, London. Disponível em <<https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>> Acesso em 11/08/2023.

BP, 2022. **BP Statistical Review of World Energy 2022**. British Petroleum, London. Disponível em <<https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>> Acesso em 12/08/2023.

BRASIL, N.I do; ARAÚJO, M.A.S.; DE SOUSA, E.C.M. **Processamento Primário de Petróleo e Gás**. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

BUGAJE, A.B., CREMER, J. L., STRBAC, G. **Real-time transmission switching with neural networks**. IET Generation, Transmission and Distribution. v. 17, n. 3, Fev. 2023

BUGAJE, A. B; DIOHA, M. O.; DUKUMA, M.C.A; WAKIL, M. **Rethinking the position of natural gas in a low-carbon energy transition**. Energy Research & Social Science, 2022.

CORNOT-GANDOLPHET, S.; APPERT, O.; DICKEL, R.; CHABRELIE, M. F.; ROJEY, A. **The challenges of further costs reductions for new supply options**. 22nd World Gas Conference, 2003.

CORRÊA NETO, V. **Análise de Viabilidade da Cogeração de Energia Elétrica em Ciclo Combinado com Gaseificação de Bio- massa de Cana-de-Açúcar e Gás Natural**. Tese de Mestrado. COPPE/UFRJ, 2001.

Empresa de pesquisa energética. **Plano Nacional de Energia 2030**. 2007.

European Council. Where does the EU's gas come from?, 2023. Disponível em <<https://www.consilium.europa.eu/en/infographics/eu-gas-supply/>>. Acesso em: 28/07/2023.

FIGUEROA, J.D.; FOUT, T.; PLASYNSKI, S; MCILVRIED, H; SRIVASTAVA, R.D. **Review e advances in CO₂ capture technology e the U.S. department of energy's carbon sequestration program**. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2008.

FREITAS, L.F.L ; SANTOS, R.J.O.; SANTOS, M.R.O.; SERPA, F.S.; MACEDO JUNIOR, R.O. **Gás Natural: Cenário da Produção e Processos de Tratamento**, 2021.

GE, M.; FRIEDRICH, J.; VIGNA, L. **4 Charts Explain Greenhouse Gas Emissions by Countries and Sectors**. World resources institute. Government of Canada, 2020.

International Energy agency. **The Role of Gas in Today's Energy Transitions**, 2019.

International Energy Agency. **World Energy Outlook 2020**. IEA Publications. 2020.

DELBORNE, J.A.; HASALA, D.; WIGNER, A.; KINCHY, A. **Dueling metaphors, fueling futures: “Bridge fuel” visions of coal and natural gas in the United States**. Energy Research & Social Science, v. 61, p. 101350, 2020.

KOTOWICZ, J.; BRZECZEK, M.; **Analysis of increasing efficiency of modern combined cycle power plant: A case study**. Energy, v153, p90-99. Junho de 2018. Disponível em < <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.04.030>> Acesso em: 04/08/2023.

KWON, H. M.; MOON, S. W.; KIM, T. S.; KANG, D. W.; SOHN, J. L.; & LEE, J. . **A study on 65 % potential efficiency of the gas turbine combined cycle**. Journal of Mechanical Science and Technology. v. 33, p4535 – 4543. 2019.

MILANEZ, A. Y. *et al.* **Biogás de resíduos agroindustriais: panorama e perspectivas**. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, v47, p221-275, março 2018. Disponível em < <http://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/15384>> Acesso em: 09/08/2023.

Massachusetts Institute of Technology. **The future of Natural Gas**. Estados Unidos: MIT, Junho de 2011.

MONDAL, M. K.; BALSORA, H. K.; VARSHNEY, P. **Progress and trends in CO 2 capture/separation technologies: A review**. Energy. v.46, p. 431 – 441. 2012. Disponível em < <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.08.006>> Acesso em 04/08/2023.

OHWOKA, A.; OGBUKE, I.; GOBINA, E. **Performance of pure and mixed gas transport in reconfigured hybrid inorganic membranes Pt. 2.** Membrane Technology. v. 2012, p. 7-9. 2012. Disponível em < [https://doi.org/10.1016/S0958-2118\(12\)70145-3](https://doi.org/10.1016/S0958-2118(12)70145-3)> 04/08/2023.

Organization of the Petroleum Exporting Countries. **OPEC Annual Statistical Bulletin.** 2023.

Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC). **Climate Change 2021: The Physical Science Basis,** 2021.

KOTAGODAHETTI, R.; HEWAGE, K.; PERERA, P.; SADIQ, R. **Technology and policy options for decarbonizing the natural gas industry: A critical review.** Gas Science and Engineering. v. 114, p. 204981. 2023. Disponível em < <https://doi.org/10.1016/j.jgsce.2023.204981>> Acesso em 06/08/2023.

REN21, 2017. **Renewables global futures report: great debates towards 100% renewable energy.** REN21 Secretariat Paris. Disponível em <https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/06/GFR-Full-Report-2017_webversion_3.pdf> Acesso em: 11/08/2023.

ZHANG, R. **Accelerate the utilization of natural gas, and strive for time for carbon neutralization.** 2021.

SIEMENS ENERGY. **Brownfield Transformation: Building a bridge to a new energy future.** 2022. Disponível em: < https://assets.siemens-energy.com/siemens/assets/api/uuid:cd6cee5d-f1cb-457b-b7a3-23345ab3f1fe/brownfield-transformation-white-paper-final.pdf?ste_sid=e937dbdf6f4c466173e6e7b31c6652bb> Acesso em 17/08/2023.

SILVA, A. L. F. *et al.* Processamento primário de petróleo. Escola de Ciências e Tecnologias E&P. Rio de Janeiro. Março de 2007. p.54.

SOARES, J.L. **Entenda os diferentes ciclos termodinâmicos em termelétricas. MErcurio Partners.** Disponível em <<https://mercuriopartners.com.br/ciclos-termodinamicos-termeletricas/>> Acesso em 30/07/2023.

HONG, T. **Under the goal of "Carbon Neutrality" China's natural gas is indispensable but its development will be compressed.** 2021.

THOMAS, J.E. **Fundamentos de Engenharia de petróleo.** Rio de Janeiro: Editora Interciência. 2001.

UNECA. **Natural Gas: Africa's Energy Transition Accelerator.**2020. Disponível em<https://www.uneca.org/sites/default/files/keymessageanddocuments/technical_background_paper-phasing_out_coal_and_the_role_of_the_natural_.pdf> Acesso em 15 de junho de 2023

US Energy Information Administration. **About US Natural Gas pipelines - Transporting Natural Gas.** 2007. Disponível em <https://www.eia.gov/naturalgas/archive/analysis_publications/ngpipeline/index.html>

RAMACHANDRAN, V. **Blanket bans on fossil-fuel funds will entrench poverty.** Nature. Abril de 2021; 592(7855):489.

EDIGER, V.S.; BERK, I. **Future availability of natural gas: Can it support sustainable energy transition?.** Resources Policy. 2023. v.85, p. 103824. ISSN 0301-4207. Disponível em <<https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.103824>> Acesso em 16/07/2023.

WORLD ENERGY COUNCIL. **World Energy Trilemma, Time to get real - the agenda for change.** 2013. Disponível em <<https://www.worldenergy.org/publications/entry/world-energy-trilemma-time-to-get-real-a-the-agenda-for-change>> Acesso em 09/07/2023.

YANG, H.; XU, Z.; FAN, M.; GUPTA, R.; SLIMANE, R.B.; BLAND, A.E. *et al.* **Progress in carbon dioxide separation and capture: a review.** Journal of Environmental Sciences. 2008. v. 20, p. 14-27. ISSN 1001-0742. Disponível em <[https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(08\)60002-9](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(08)60002-9)> Acesso em: 29/07/2023.

SZABO, J. **Energy transition or transformation? Power and politics in the European natural gas industry's trasformismo.** Energy Research & Social Science. 2022. v.84, p. 102391. ISSN 2214-6296. Disponível em <<https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.102391>> Acesso em 17/07/2023.

WANG, Z.; KONG, Y.; LI, W. **Review on the development of China's natural gas industry in the background of "carbon neutrality".** Natural Gas Industry B. 2022. v.9, p.132-140. ISSN 2352-8540. Disponível em <<https://doi.org/10.1016/j.ngib.2021.08.021>> Acesso em 07/07/2023.

SHUHUI, Z.; JUN, W. & YAN, L. **Development of China's natural gas industry during the 14 Five-Year Plan in the background of carbon neutrality.** Nat Gas Ind. 2021.

ZOU, C. *et al.* **Energy revolution: From a fossil energy era to a new energy era.** Natural Gas Industry B, v. 3, n. 1, p. 1-11, 2016.

