



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CAMPUS LAGOA DO SINO
CENTRO DE CIÊNCIAS DA NATUREZA

**SUSTENTABILIDADE ESG (*Environmental, social, and corporate governance*): A
INDÚSTRIA DE PETRÓLEO E GÁS COMO ATORES FUNDAMENTAIS NA
TRANSIÇÃO ENERGÉTICA**

JUAN FELIPE PEREIRA DE ALMEIDA
RAFAEL DE OLIVEIRA TIEZZI

BURI - SP

2024

JUAN FELIPE PEREIRA DE ALMEIDA

**SUSTENTABILIDADE ESG (*Environmental, social, and corporate governance*): A
INDÚSTRIA DE PETRÓLEO E GÁS COMO ATORES FUNDAMENTAIS NA
TRANSIÇÃO ENERGÉTICA**

Trabalho de conclusão de curso
submetido ao curso de Bacharelado em
Engenharia Ambiental da UFSCar,
Campus Lagoa do Sino do Centro de
Ciências da Natureza CCN, como
requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Ambiental.

Área de concentração: Engenharia
Ambiental

Orientador: Rafael de Oliveira Tiezzi

BURI - SP

2024

Pereira de Almeida, Juan Felipe

Sustentabilidade ESG (Environmental, Social, and Corporate Governance): : A indústria de petróleo e gás como atores fundamentais na transição energética / Juan Felipe Pereira de Almeida -- 2024.
42f.

TCC (Graduação) - Universidade Federal de São Carlos, campus Lagoa do Sino, Buri

Orientador (a): Rafael de Oliveira Tiezzi

Banca Examinadora: Iuri Emmanuel de Paula Ferreira, Jorge Luis Rodrigues Pantoja Filho

Bibliografia

1. Matriz energética . 2. Captura de carbono. 3. Energias renováveis. I. Pereira de Almeida, Juan Felipe. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática (SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Lissandra Pinhatelli de Britto - CRB/8 7539

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

CENTRO DE CIÊNCIAS DA NATUREZA

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

Folha de Aprovação

Assinatura dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Trabalho de Conclusão de Curso do(a) candidato(a) Juan Felipe Pereira de Almeida realizada em 01/08/2024:

Prof Dr. Rafael de Oliveira Tiezzi – Orientador(a)
Centro de Ciências da Natureza – UFSCar – Campus Lagoa do Sino.

Prof Dr. Iuri Emmanuel de Paula Ferreira
Instituição do Avaliador 1

Prof Dr. Jorge Luis Rodrigues Pantoja Filho
Instituição do Avaliador 2

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha mulher, por todo apoio durante essa jornada árdua de graduação, sem ela isso não seria possível.

AGRADECIMENTO

Agradeço aos meus pais por todo suporte durante o período acadêmico. Agradeço também à minha mulher por sempre me incentivar e me apoiar.

RESUMO

A história da humanidade está profundamente ligada à evolução do uso coletivo da energia, sendo essencial equilibrar os sistemas de produção para o desenvolvimento sustentável. Este trabalho destaca a contribuição estratégica da indústria brasileira de petróleo e gás natural na construção de uma matriz energética de baixo carbono, apontando como principal achado a importância dessa transição para fontes de energia mais sustentáveis, como energia solar, hidrogênio verde e tecnologias de captura de carbono. A pesquisa procurou abordar os principais argumentos de melhor relevância para o desenvolvimento do trabalho, elencando uma abordagem metodológica através da revisão bibliográfica para construção do pensamento crítico para se chegar em resultados plausíveis acerca do tema, integrando a economia e meio ambiente para demonstrar que a transição energética, impulsionada pelas mudanças climáticas, é fundamental para enfrentar os desafios globais e garantir um futuro equilibrado.

Palavras chaves: Matriz energética; Captura de carbono; Energias renováveis; Impactos ambientais; Soluções sustentáveis.

ABSTRACT

The history of humanity is deeply linked to the evolution of the collective use of energy, and it is essential to balance production systems for sustainable development. This work highlights the strategic contribution of the Brazilian oil and natural gas industry in the construction of a low-carbon energy matrix, pointing out as the main finding the importance of this transition to more sustainable energy sources, such as solar energy, green hydrogen and carbon capture technologies. The research sought to address the main arguments of best relevance to the development of the work, listing a methodological approach through the literature review to build critical thinking to reach plausible results on the subject, integrating the economy and the environment to demonstrate that the energy transition, driven by climate change, is fundamental to face global challenges and ensure a balanced future.

Keywords: Energy matrix; Carbon capture; Renewable energies; Environmental impacts; Sustainable solutions.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	pág. 14
Figura 2	pág. 16
Figura 3	pág. 16
Figura 4	pág. 24
Figura 5	pág. 30
Figura 6	pág. 32
Figura 7	pág. 33
Figura 8	pág. 34
Figura 9	pág. 35

LISTA DE SIGLAS

SIN - Sistema Interligado Nacional

IPCC - Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas

GEE - Gases de efeito estufa

CCUS - (Carbon Capture, Utilization and Storage) - Captura, uso e armazenamento de carbono

IAGEE - Indicador de Atendimento às metas de Gases de Efeito Estufa

CSP - (Concentrated Solar Power) Sistema de Energia Solar Térmica Concentrada

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	10
2. METODOLOGIA DA PESQUISA.....	13
3. OBJETIVOS.....	14
3.1. GERAL.....	14
3.2. ESPECÍFICO.....	14
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
4.1. ENERGIA E O LANÇAMENTO DOS GASES DE EFEITO ESTUFA (GEE).....	15
4.2. A NECESSIDADE DE DESENVOLVER E TRANSFORMAR A MATRIZ ENERGÉTICA PARA UMA MATRIZ ENERGÉTICA DE BAIXO CARBONO....	17
4.3. MODELOS DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA PARA A TRANSIÇÃO DA MATRIZ ENERGÉTICA PARA UMA MATRIZ DE BAIXO CARBONO.....	18
4.3.1. ENERGIA SOLAR.....	18
4.3.2. HIDROGÊNIO VERDE.....	21
4.4. CONSIDERAÇÕES.....	22
5. PANORAMA DE ANÁLISES.....	23
5.1. A GRAVIDADE AMBIENTAL DEVIDO A CONJUNTURA DA MATRIZ ENERGÉTICA ATUAL PARA SOCIEDADE MODERNA E PARA AS FUTURAS GERAÇÕES.....	23
5.2. CONSCIÊNCIA DA SUSTENTABILIDADE BASEADA NOS LIMITES DE CRESCIMENTO ECONÔMICO IMPULSIONADO PELOS PROBLEMAS DAS EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA (GEE).....	26
5.3. CONSIDERAÇÕES.....	28
6. ARGUMENTAÇÃO.....	28
6.1. IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS E CRISES AMBIENTAIS....	28
6.2. CONSIDERAÇÕES.....	36
7. CONCLUSÃO.....	36
REFERÊNCIA	

1. INTRODUÇÃO

De acordo com a historiografia, as grandes revoluções têm ocorrido quando novas tecnologias e formas de compreender o mundo provocam transformações profundas nas estruturas sociais e nos sistemas econômicos. É notável que a primeira mudança significativa em nossa maneira de viver, foi a transição da coleta de alimentos para a agricultura, que aconteceu cerca de 10 mil anos atrás, na qual possibilitou a domesticação de animais (Sauer, 2015). Logo, essa revolução agrícola combinou a força animal com a humana, aumentando a produção de alimentos, o que resultou no crescimento populacional e no surgimento de assentamentos humanos em maior escala, permitindo a urbanização e ao aparecimento das cidades (Sauer, 2015).

Por outro lado, uma série de revoluções industriais começaram na segunda metade do século XVIII. Uma característica marcante dessas revoluções foi a substituição da força muscular pela energia mecânica, evolução que culminou na atual quarta revolução industrial, marcada pela ampliação das capacidades humanas por meio de avanços na cognição. A primeira revolução industrial, ocorrida entre 1760 e 1840, foi impulsionada pela construção de ferrovias e pela invenção da máquina a vapor, locomotivas a vapor e navios dando início à produção mecanizada (Sauer, 2015). Contudo, a segunda revolução industrial, marcada entre o final do século XIX e início do XX, trouxe consigo a eletricidade e as linhas de montagem, em que permitiu a produção em massa (Schwab, 2016).

Ademais, a terceira revolução industrial, que começou na década de 1960, sendo conhecida como a revolução digital ou até mesmo da informática, desencadeada pelo desenvolvimento de semicondutores, da computação em mainframes (nos anos 1960), computadores pessoais (nas décadas de 1970 e 1980) e da internet (na década de 1990). Apesar de existirem diversas definições acadêmicas para as três primeiras revoluções industriais, atualmente acredita-se que estamos iniciando a quarta revolução industrial, tendo início no começo do século XXI e está fortemente respaldada na revolução digital (Schwab, 2016).

Na contemporaneidade, a nova era é caracterizada pela internet, na qual possibilitou o uso de dispositivos mais móveis e onipresentes, utilizando sensores cada vez mais baratos e potentes, e pelos avanços em inteligência artificial e aprendizado de máquina. Ainda que as tecnologias digitais não sejam novidade, sua sofisticação crescente e integração profunda estão causando rupturas, transformando a sociedade e a economia mundial (Schwab, 2016). Em alguns países, como na Alemanha, o conceito de "Indústria 4.0", comunicado em 2011 na

feira de Hannover, descreve como essa nova fase reorganiza as cadeias globais de valor, viabilizando as "fábricas inteligentes", em que sistemas físicos e virtuais cooperam de maneira flexível e global. Dessa forma, proporciona a abertura de caminhos para a personalização em massa de produtos e a criação de novos modelos operacionais (Schwab, 2016).

Apesar disso, a quarta revolução industrial dirige-se mais adiante de máquinas e sistemas inteligentes conectados, visto que seu impacto abrange uma gama muito mais ampla, com avanços simultâneos em campos como o sequenciamento genético, nanotecnologia, energias renováveis e computação quântica. Dessa maneira, ocorre uma grande diferença entre a atual revolução quando comparado com as anteriores, ocasionando a convergência dessas tecnologias e a interação entre os domínios físico, digital e biológico (Schwab, 2016).

Vale ressaltar que no momento atual, estamos vivendo uma nova alteração no modo de vida da sociedade, na qual está relacionado ao ESG (Environmental, Social e Governance), viabilizando uma nova revolução. As preocupações com ambientais, questões sociais e governança corporativa, têm influenciado cada vez mais as decisões empresariais sobre quais estratégias implementar e quais resultados são esperados tanto pela sociedade quanto pelos seus principais interessados. No entanto, o termo ESG, que em português significa ASG - Ambiental, Social e Governança, abrange um conjunto diversificado de tópicos, desde o impacto ambiental, como a emissão de carbono, até condutas trabalhistas e anticorrupção. Por consequência, isso impulsiona a criação de critérios e políticas que definem o papel e a responsabilidade das empresas em aspectos de novas práticas mais sustentáveis (Irigaray; Stocker, 2022).

A indústria brasileira de petróleo manuseia primordialmente a nafta como insumo na produção petroquímica nacional. A nafta é um líquido formado por uma mistura de hidrocarbonetos, produzido durante o refino do petróleo. É uma substância com uma fração leve utilizada na produção de compostos petroquímicos básicos, especialmente olefinas com até três átomos de carbono e compostos aromáticos. Essa fração é obtida através da destilação do petróleo ou da fração pesada do gás natural, e sua composição pode variar, apresentando maior ou menor quantidade de hidrocarbonetos parafínicos. Portanto, a nafta é essencial na produção de gasolina e na indústria química, onde serve como base para criar uma ampla variedade de produtos derivados (Petrobras, 2021).

No entanto, a indústria de petróleo e gás natural se beneficia do fundamento da química orgânica para extrair subprodutos do petróleo, como gás natural, gases liquefeitos de

petróleo, gases residuais de refinaria, naftas, querosene, parafinas, resíduos de refinamento de petróleo e petróleo cru (Dos Santos, 2022).

Por outro lado, a indústria de petróleo e gás natural utiliza uma fonte de energia elementar de extrema complexidade para ser substituída no curto espaço de tempo, pois devido a alta demanda por consumo de produtos derivados de petróleo e em particular o próprio petróleo, alterações abruptas na matriz energética acarretaria em flutuações de preços nesses produtos (Dos Santos, 2022).

No ano de 1972, ocorreu a primeira conferência internacional cujo tema em especial mencionava o desenvolvimento e as influências humanas sobre o meio ambiente, sediado na Suécia, em Estocolmo. Líderes de 113 países, foram reunidos na “Conferência das Nações Unidas sobre o Ambiente Humano”, na qual foram sujeitos a debaterem em diferentes formas de desenvolvimento humano. Dessa forma, surge o que chamamos de “ecodesenvolvimento” (Araújo, 2008). Em outras palavras, segundo Sachs (1985):

“Ecodesenvolvimento significa o desenvolvimento endógeno e dependente de suas próprias forças, tendo por objetivo responder à problemática da harmonização dos objetivos sociais e econômicos do desenvolvimento com uma gestão ecologicamente prudente dos recursos e do meio”.

Nesse sentido, percebe-se que a sociedade moderna enfrenta um impasse de grande complexidade. Por essa razão, há uma necessidade de garantir suprimento para civilização atual e principalmente para futuras gerações, mas respeitando a teoria da sustentabilidade, e ao mesmo tempo impedir desastres globais. À vista disso, emerge o entendimento de transição energética (Frigo; Caneppele; Godinho, 2023).

Sob outra perspectiva, a transição energética é o processo de mudar de um sistema energético baseado em combustíveis fósseis para outro focado em fontes de energia mais limpas e sustentáveis. Esse processo envolve várias etapas, incluindo a descarbonização gradual, a eletrificação, a adoção de energias renováveis, e o desenvolvimento de produtos de baixo carbono (Petrobras, 2021).

De forma semelhante, pesquisas revelam que há uma explícita ameaça representada pelo aquecimento global, visto que diversas famílias no mundo enfrentam a falta de acesso a recursos essenciais, como água potável, alimentos, saneamento básico e, na maioria dos casos, energia. Apesar disso, mudanças climáticas, aumento desenfreado da temperatura, chuvas torrenciais não são preocupações distantes da realidade, contudo consiste em uma realidade vigente (Fonseca, 2022).

Isto posto, a mudança no paradigma energético é uma dinâmica global a caminho da alteração de combustíveis fósseis por fontes de energia com menor pegada de carbono. Descobrir o equilíbrio entre garantir o acesso à energia de qualidade, segura, acessível, inclusiva e ambientalmente responsável, ao mesmo tempo em que se alinha com as metas climáticas globais, requer uma adaptação às realidades socioeconômicas e ambientais de cada país. Consequentemente, é um processo intrincado que demanda mudanças substanciais na forma como a energia é fornecida e utilizada (Epe, 2024).

Desta maneira, neste projeto o enfoque será dado na mudança da matriz energética brasileira e mundial para uma transição energética de menor pegada de carbono. Entretanto, a transição para fontes de energia com menor impacto ambiental é crucial para alcançar os objetivos de combate às mudanças climáticas em escala global e assegurar um futuro sustentável.

2. METODOLOGIA DA PESQUISA

A fim de concretizar a temática da transição energética para uma indústria de baixo carbono, foi realizada uma revisão bibliográfica, visando reunir e avaliar diferentes estudos sobre os impactos da atual matriz energética. A revisão focou nos efeitos adversos para o meio ambiente, sociedade atual e gerações futuras, analisando publicações que tratam diretamente da transição energética. Dessa maneira, os artigos foram selecionados a partir de bases de dados acadêmicos, revistas científicas, Empresa de Pesquisa Energética (EPE), Petrobras para garantir a precisão e relevância dos estudos, sendo adotado os seguintes critérios de para inclusão ou não dos artigos:

- Publicações que trazem contexto histórico até os anos de 2024;
- Artigos que abordam diretamente a transição energética e seus impactos ambientais;
- Estudos focados em políticas energéticas e tecnologias de baixo carbono e;
- Revisões e estudos de caso sobre o setor industrial.

Para a exclusão dos artigos, procurou-se basear em:

- Artigos sem revisão por pares;
- Publicações que não abordavam o setor industrial e até mesmo a transição energética e;
- Estudos que tratavam exclusivamente de energias fósseis, sem discutir alternativas renováveis.

Deste modo, optou-se por uma revisão bibliográfica devido à sua capacidade de fornecer uma visão abrangente sobre o estado da arte no campo da transição energética. Logo, este método permite reunir informações consolidadas, identificar lacunas no

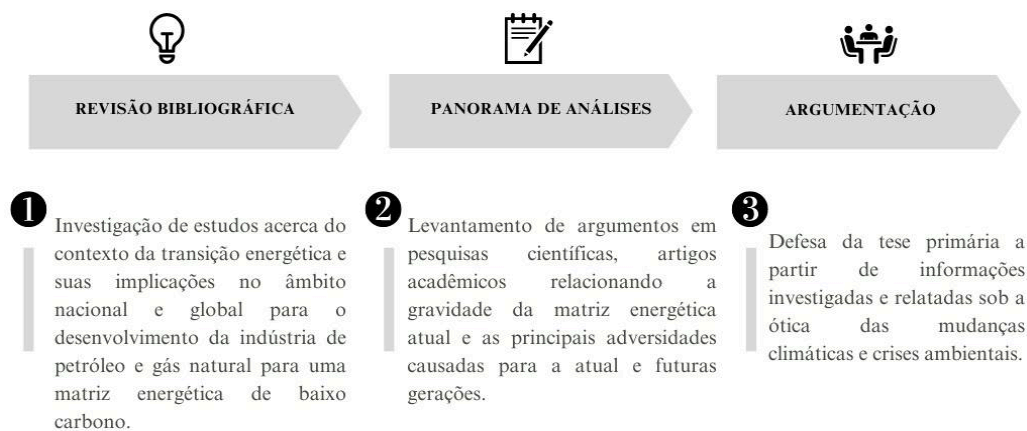
conhecimento e avaliar as diferentes perspectivas sobre os desafios e soluções para uma indústria de baixo carbono. Apesar disso, a coleta de dados foi conduzida utilizando palavras-chave específicas, como transição energética, matriz energética de baixo carbono, tecnologias industriais sustentáveis, impacto ambiental e matriz energética.

Os dados extraídos dos artigos foram analisados com base em critérios de avaliação específicos, como:

- Relevância da contribuição para o tema de transição energética;
- Análise dos impactos ambientais descritos;
- Eficiência das tecnologias e políticas de baixo carbono apresentadas e;
- Soluções propostas para mitigação de impactos.

Logo, cada artigo foi avaliado em relação à credibilidade dos dados apresentados e à aplicabilidade de suas propostas na realidade atual. Após a análise, os dados foram ponderados de acordo com a robustez metodológica e as conclusões levantadas por cada autor. Dessa maneira, se faz necessário a exemplificação através do fluxograma para melhor interpretação (**Figura 1**).

Figura 1 - Diagrama ilustrativo das fases da metodologia aplicada.



Fonte: Autoria própria, 2024.

3. OBJETIVOS

3.1. GERAL

Investigar o papel da indústria de petróleo e gás natural no contexto da transição energética para uma economia de baixo carbono, analisando suas implicações ambientais e seu potencial de transformação para uma matriz energética mais sustentável no Brasil.

3.2. ESPECÍFICO

1. Mapear o cenário atual da indústria de petróleo e gás natural no Brasil, identificando os principais usos e subprodutos fornecidos à sociedade;

2. Examinar as consequências ambientais da produção e uso de energia dessa indústria, com foco nos impactos sobre os ecossistemas e mudanças climáticas;
3. Analisar alternativas e estratégias para a transformação da matriz energética nacional, visando a redução de emissões de gases de efeito estufa e a transição para uma indústria de baixo carbono.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1. ENERGIA E O LANÇAMENTO DOS GASES DE EFEITO ESTUFA (GEE)

A energia é conhecida como a habilidade de executar trabalho. O princípio fundamental da Primeira Lei da Termodinâmica é o princípio da conservação de energia, de acordo com o físico inglês James Prescott Joule (1818), a energia não pode ser criada ou destruída, a mesma pode ser apenas transferida ou transformada de um objeto para outro.

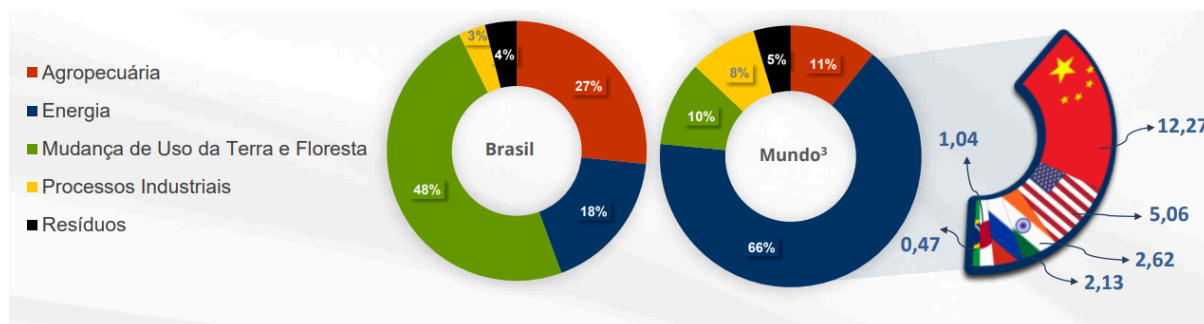
Pelo o mundo são encontradas distintas formas de energia, como a energia gravitacional, energia química, energia elétrica, energia nuclear, energia térmica, entre outras (Smets, 2016). Além disso, o fornecimento de energia é primordial para o desenvolvimento econômico sustentável, uma vez que a mesma é recurso indispensável para o exercício industrial (Paixão; Miranda, 2018). Em consequência disso, o aumento da demanda energética advinda do aumento populacional, estabelece um conflito no que se refere ao fornecimento de energia para a sociedade, uma vez que a sociedade contemporânea é dependente exclusivamente de uma infraestrutura energética baseada em petróleo, gás natural e carvão, provocando um aumento das emissões de gases de efeito estufa (GEE), em função da queima de combustíveis fósseis (Smets, 2016).

Em outros países, assim como no Brasil, o petróleo representa um papel determinante para a indústria energética e além disso este recurso reflete no desenvolvimento industrial e econômico. A energia adquirida oriunda de petrolíferas é vital para a indústria brasileira, visto que para o funcionamento das usinas termelétricas, mesmo que a fonte principal seja a energia hidráulica, a geração de energia térmica é fundamental para suprir as demandas em períodos de alto consumo, principalmente em tempo de crises hídricas, que se acentuam com as crises climáticas tendo a necessidade de atingir áreas que não estão integradas ao Sistema Interligado Nacional (SIN). Deste modo, para que não falte suprimento na cadeia energética, o petróleo é um recurso substancialmente intrincado na produção dos produtos e subprodutos para consumo, tanto no aspecto direto e indireto, devido a variedade de derivados (Dos Santos, 2022).

Ao comparar com o cenário global, a matriz energética brasileira é substancialmente equilibrada na geração de fontes renováveis e não-renováveis. Ademais, a indústria brasileira

é referência na distribuição de gases de efeito estufa (GEE) por cada setor da economia nacional, em contrapartida o setor de energia mundial é responsável por emitir os gases de efeito estufa (GEE). À vista disso, os setores mais representativos no Brasil são os setores de mudança no uso e ocupação da terra, florestas e agropecuária (Epe, 2024).

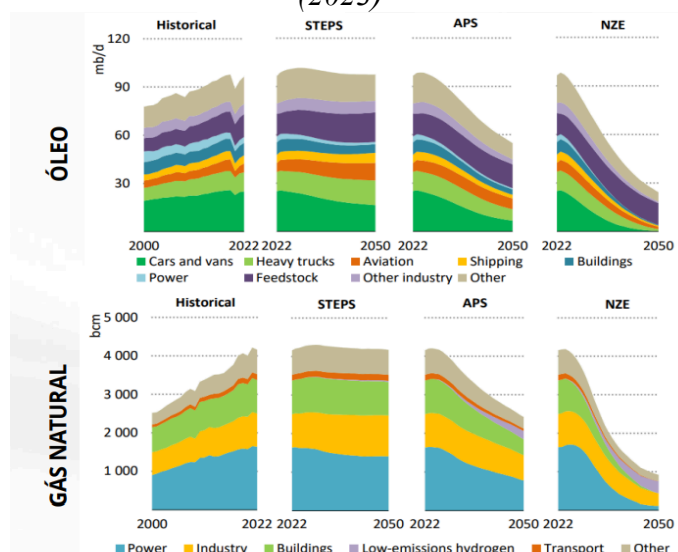
Figura 2 - Desempenho de Emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE).



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2022.

Ao desenvolver tecnologias para a descarbonização da matriz energética atual, o setor de petróleo e gás natural simultaneamente a esse progresso, ainda continuará tendo uma enorme representatividade no setor energético. Mesmo com as projeções de diminuir a oferta para os próximos decênios, a indústria de petróleo e gás natural corresponderá primordialmente para o setor industrial energético, uma vez substituir totalmente os produtos e subprodutos finais torna-se inviável para algumas indústrias, principalmente a petroquímica (Figura 3).

Figura 3 - Demandas por óleo e gás natural, em diferentes cenários, até 2050 segundo IEA (2023)



Fonte: Agência Internacional de Energia (International Energy Agency - IEA), 2023.

4.2. A NECESSIDADE DE DESENVOLVER E TRANSFORMAR A MATRIZ ENERGÉTICA PARA UMA MATRIZ ENERGÉTICA DE BAIXO CARBONO

Em decorrência das mudanças climáticas e outros riscos ao meio ambiente e a comodidade socioeconômica tornar-se visível as complexidades ambientais. Conforme cita WONG, a ciência voltada para a tecnologia de energia de baixo carbono é vista por alguns especialistas como a "força motriz" que molda o próximo paradigma técnico-econômico. Dessa forma, o reconhecimento de diversas economias propicia a eficácia da ciência e tecnologia no setor de energia renovável, conduzindo recursos para estratégias de pesquisas energéticas de baixo carbono norteando rumos para o desenvolvimento da indústria (Suzigan, 2015). A transformação tecnológica exige um elemento essencial para impulsionar o desenvolvimento e a adoção de tecnologias renováveis eficientes, que é a inovação. Tal modificação ocorre ao longo de todo o ciclo de vida das novas tecnologias, progredindo constantemente. Conforme as pesquisas avançam, permitem aprimorar seus métodos, desenvolvendo novas estratégias que indiquem como devem ser as projeções para a comercialização deste novo mercado (Suzigan, 2015).

Ainda assim, a substituição da matriz energética atual para uma matriz energética renovável é imprescindível. Em tempos anteriores, a modificação energética representava um desafio não só economicamente, mas também dificuldades em cunho tecnológico. Entretanto, o principal fomentador dessa reorganização matricial é a exigência de controlar as mudanças climáticas, uma vez que na sociedade contemporânea, o resultado dessas mudanças é fruto das ações antrópicas (Delgado; Filgueiras, 2022).

Além de tudo, mesmo que fontes renováveis de energia apresentam uma redução significativa nos custos nos últimos decênios, a matriz energética originária de fontes fósseis até o presente, demonstra uma segurança incontestável. Deste modo, torna-se nítido como um dos elementos de empecilho para transição da matriz energética (Delgado; Filgueiras, 2022). O ramo energético representa aproximadamente 75% das emissões de gases do efeito estufa, ocupando uma posição central nos debates referentes às mudanças climáticas. Ainda assim, a indústria brasileira se encontra consideravelmente mais alinhada com o perfil energético idealizado para a matriz global nos próximos decênios (Delgado; Filgueiras, 2022).

A captura de carbono é uma tecnologia que visa a utilização e o armazenamento deste gás, exercendo um notável papel no cumprimento das metas energéticas e climáticas mundial. No entanto, essa tecnologia viabiliza a captura do dióxido de carbono (CO_2) em inúmeros momentos de emissões que são utilizados recursos fósseis e até mesmo biomassa. Além do

mais, a técnica para o transporte deste produto (dióxido de carbono) é baseada na compressão deste gás, transferindo através de navios e gasodutos até as localidades na qual serão reutilizados e armazenados (IEA, 2022). À vista disso, desde 2022 até 2026 o plano estratégico está concentrado no compromisso da Petrobras em atingir os índices concebíveis para o cumprimento das metas estabelecidas para o Indicador de Atendimento às metas de Gases de Efeito Estufa (IAGEE). Portanto, para que haja o cumprimento dessas estratégias a companhia se concentrou para os próximos intervalos de tempo nos seguintes preceitos (Dos Santos, 2022) (**Tabela 1**).

Tabela 1 - Métricas estabelecidas da Petrobras para o Indicador de Atendimento às metas de Gases de Efeito Estufa (IAGEE).

Processo	Meta (IAGEE)
Exploração e Produção (E&P)	16,5 kg de CO_2 e/boe*
Refino	39,2 kg de CO_2 e/boe*
* kg CO_2 e/boe – quilogramas de CO_2 equivalente/barril de óleo equivalente	

Fonte: Dos Santos, 2022.

Isto posto, a Petrobras se sobressai no cenário global com seu programa de captura, uso e armazenamento de carbono (CCUS), sendo o líder em volume de CO_2 reinjetado. Iniciado em 2008, esse programa tem aumentado consideravelmente a quantidade de CO_2 reinjetada a cada ano, alcançando um recorde mundial em 2022 com 10,6 milhões de toneladas. A tecnologia CCUS da Petrobras não só impede a liberação de CO_2 na atmosfera, mas também aprimora a eficiência da produção de petróleo, estabelecendo-se como um modelo na indústria para um futuro de baixa emissão de carbono. A constante inovação e desenvolvimento de novas tecnologias sustentáveis reforçam o compromisso da Petrobras com a diminuição das emissões de gases de efeito estufa, alinhando-se aos objetivos climáticos globais e às suas próprias metas de sustentabilidade e eficiência operacional (Petrobras, 2023).

4.3. MODELOS DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA PARA A TRANSIÇÃO DA MATRIZ ENERGÉTICA PARA UMA MATRIZ DE BAIXO CARBONO

4.3.1. ENERGIA SOLAR

A principal fonte de energia que ampara os seres vivos na Terra, é conhecida como Sol. Ao equiparar com as diferentes fontes de energia existentes e utilizadas, o mesmo possui um princípio interminável. Desta maneira, a potência energética proveniente desta estrela anã

amarela é suficientemente para atender as necessidades energéticas constantemente, a provocação que permeia as discussões acadêmicas, seria em como se beneficiar da energia gradativamente e ao mesmo tempo ser eficiente com baixos custos (Suzigan, 2015).

Há dois essenciais sistemas utilizados na produção de eletricidade que suporta a radiação solar, como o heliotérmico, mais conhecido como sistema de energia solar térmica concentrada (CSP) e o fotovoltaico, sendo conhecido como sistema elementar a célula fotovoltaica. De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL (2008):

“No Sistema heliotérmico, a radiação solar é captada e convertida em calor, que é então transformada em energia mecânica e, posteriormente, em eletricidade. Por sua vez, este sistema depende de locais com alta incidência de radiação solar direta, implicando em baixa nebulosidade e baixos índices de precipitação. Em contrapartida, sistemas fotovoltaicos convertem diretamente a radiação solar em energia elétrica, pois quanto maior a intensidade da luz, maior a geração de energia elétrica.”

Apesar de a tecnologia CSP demandar investimentos iniciais mais altos quando comparado com algumas outras fontes de energia, apresenta notáveis competitividade no longo prazo. Por outro lado, os custos iniciais tendem a diminuir progressivamente à medida que as plantas operacionais se expandem, aumentando a concorrência entre os desenvolvedores de CSP. Logo, a produção em massa de equipamentos se intensifica e a tecnologia evolui com a experiência acumulada, adquirindo notoriedade e mais confiança da cúpula do mercado financeiro (Philibert, 2010).

Além disso, o desenvolvimento da tecnologia solar fotovoltaica vem se destacando como uma das tecnologias mais promissoras no campo energético. Ainda que essa tecnologia seja considerada madura e tenha passado por um extenso aprimoramento e consequentemente uma significativa redução de custos nos últimos anos, ainda há excessivos espaço para inovações e avanços no longo prazo, visto que as melhorias tecnológicas provavelmente serão fundamentais para futuras reduções de custos (Zheng; Kammen, 2014).

Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica, também conhecidos como ON-Grid, têm experimentado um crescimento acelerado em países desenvolvidos. Esses sistemas atuam como uma fonte de energia complementar à rede elétrica convencional, sendo utilizados em áreas já abastecidas por eletricidade. A principal função desse tipo de sistema solar é converter a luz solar em energia elétrica, enquanto a rede de distribuição da

concessionária serve como uma espécie de “bateria”, armazenando o excesso de energia gerada (Alves, 2019).

O sistema ON-Grid opera por meio da geração distribuída, que pode ser categorizada de acordo com a quantidade de energia produzida. Quando se trata de microgeração, essas instalações costumam estar em residências ou propriedades próximas ao local onde a energia será consumida. Ainda assim, a microgeração é, em grande parte, aplicada em edifícios comerciais e outros empreendimentos de maior porte (Alves, 2019).

Em países desenvolvidos, o uso de sistemas fotovoltaicos conectados à rede tem se expandido significativamente, e espera-se que esse modelo se dissemine em áreas urbanas ensolaradas ao redor do mundo. Isso porque, durante o dia, quando há maior demanda por eletricidade, os sistemas ON-Grid podem contribuir para a estabilidade da rede, especialmente em períodos de pico de consumo. No verão, quando a demanda energética cresce, a produção de energia solar tende a coincidir com esse aumento, uma vez que há maior disponibilidade de luz solar (Alves, 2019).

O Brasil, com sua abundância de energia solar, apresenta grande potencial para se destacar nesse cenário. Nas cidades brasileiras, especialmente no verão, a demanda por eletricidade, impulsionada pelo uso de aparelhos de ar-condicionado, costuma ser alta durante o dia. Essa demanda pode ser atendida de forma eficiente pelos sistemas fotovoltaicos, uma vez que a geração de energia solar tende a coincidir com o período de maior consumo e consequentemente poderá servir como crédito de energia, caso a população tenha interesse de instalar em suas residências (Alves, 2019).

Os sistemas OFF-Grid, mais conhecidos como sistemas independentes, são aqueles que funcionam de maneira autônoma, sem estarem conectados à rede elétrica convencional. Esses sistemas operam isoladamente, sem necessidade de funcionar em conjunto com a rede de energia pública. Conforme o decreto de 2010, os sistemas isolados referem-se a redes de distribuição de energia elétrica que, por razões técnicas ou econômicas, não estão ligadas ao Sistema Interligado Nacional (SIN). Logo, as regiões remotas são áreas com pequenos grupos de consumidores localizados em sistemas isolados, distantes dos centros urbanos e que carecem de economias de escala ou densidade populacional significativa (Alves, 2019). Nos dias de hoje, mais de 800 milhões de pessoas no mundo ainda vivem sem acesso à eletricidade e por este motivo, esses dados ressaltam a importância de garantir que todos tenham acesso à energia, como forma de proporcionar uma qualidade de vida adequada (Alves, 2019).

Em consequência disso, a descentralização do fornecimento de energia e o uso de fontes renováveis aparecem como soluções viáveis para reduzir essa lacuna, pois em áreas mais distantes dos principais centros de geração, a dificuldade de acesso à energia elétrica é evidente. Isso se deve, principalmente, aos elevados custos de transmissão e distribuição, além da baixa demanda em comparação com regiões mais urbanizadas. Para atender esses consumidores, seria necessário construir uma extensa rede de transmissão em alta tensão, o que não é economicamente viável para as concessionárias de energia (Alves, 2019).

Diante disso, os sistemas OFF-Grid se apresentam como uma alternativa eficiente para fornecer energia a áreas isoladas, onde a rede de distribuição é inexistente ou insuficiente. Vejamos alguns exemplos de aplicações que incluem áreas rurais, fazendas, estacionamentos e regiões costeiras. Portanto, esses sistemas por serem autossuficientes, armazenam energia em baterias, garantindo fornecimento durante períodos em que não há produção de energia, como à noite (Alves, 2019).

4.3.2. HIDROGÊNIO VERDE

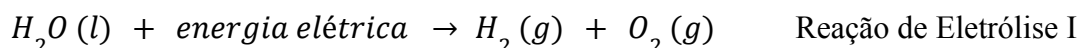
É sabido que o hidrogênio (H) é o elemento com maior predominância, sendo o quarto mais considerável na Terra. Além disso, este elemento está intimamente ligado a outros elementos da tabela periódica, formando moléculas como no caso da água (H₂O). A obtenção do combustível de hidrogênio (H₂) exige recursos tecnológicos altamente específicos para adquirir uma quantidade considerável de energia (Bezerra, 2021).

Diante da baixa emissão de gases poluentes para a atmosfera, o hidrogênio (H) possui a capacidade para descarbonizar diferentes setores da economia, visto que ao desenvolver projetos e iniciativas através de estratégias governamentais, favorece o engajamento dos principais players da economia nacional e mundial, possibilitando a visibilidade do setor energético (Bezerra, 2021).

Ademais, a depender das metas de desenvolvimento da indústria para descarbonizar o setor energético de cada país e até mesmo quais meios provenientes da natureza irão utilizar na produção, sairá como produto final um tipo de hidrogênio específico e de baixa emissão. No entanto, a geração do hidrogênio pode ser obtida através de diversos processos, uma vez que a variedade de níveis de emissões dependerá da tecnologia e da origem energética empregada (Bezerra, 2021).

Tal tecnologia vem sendo discutida considerando como a singular oportunidade para obtenção de energia renovável mais promissora no mundo. Outro caminho tecnológico, emprega a utilização de eletricidade proveniente de fontes renováveis para realizar a eletrólise da água. Dessa forma, o processo resulta na geração de hidrogênio e oxigênio

gasosos quimicamente puros (Epe, 2022). A representação química é demonstrada conforme descrito pela Reação de Eletrólise da água I.



Atualmente, os métodos de produção de hidrogênio podem ser classificados de acordo com as três principais matérias-primas empregadas como, combustíveis fósseis, água e biomassa. A obtenção de hidrogênio por processos biológicos pode ser feita de várias maneiras, como: biofotólise direta da água com o uso de algas verdes, biofotólise indireta realizada por cianobactérias, foto-fermentação de compostos orgânicos com bactérias fotossintéticas, fermentação anaeróbia de compostos orgânicos por bactérias fermentativas, e sistemas híbridos que combinam bactérias fotossintéticas e fermentativas (De Sá; Cammarota; Ferreira-Leitão, 2014).

Na biofotólise direta, que ocorre geralmente em condições anaeróbicas com algas verdes, a energia da luz é utilizada para romper moléculas de água, liberando hidrogênio. Já na biofotólise indireta, cianobactérias convertem os carboidratos resultantes da fotossíntese em hidrogênio e água. A foto-fermentação, por sua vez, é realizada por bactérias púrpuras que, utilizando luz, transformam ácidos orgânicos em hidrogênio e dióxido de carbono. A fermentação anaeróbica envolve bactérias que, na ausência de oxigênio, convertem os carboidratos em hidrogênio. Portanto, esses métodos podem ser combinados em diferentes sistemas para ampliar as alternativas tecnológicas de produção biológica de hidrogênio (De Sá; Cammarota; Ferreira-Leitão, 2014).

4.4. CONSIDERAÇÕES

O panorama energético mundial está intrinsecamente ligado à questão dos gases de efeito estufa (GEE) e às mudanças climáticas. A energia é essencial para o desenvolvimento econômico sustentável, porém, o modelo energético atual, baseado predominantemente em combustíveis fósseis, tem causado um aumento significativo nas emissões de GEE. Nesse contexto, a busca por uma matriz energética de baixo carbono se torna imperativa.

A transição para uma matriz energética mais sustentável não é apenas uma necessidade ambiental, mas também uma oportunidade para o desenvolvimento de novas tecnologias e modelos econômicos. A ciência e a inovação desempenham um papel fundamental nesse processo, impulsionando a pesquisa e o desenvolvimento de fontes renováveis de energia, como a solar e o hidrogênio verde.

A energia solar se destaca como uma fonte inesgotável e promissora, capaz de atender às crescentes demandas energéticas de forma eficiente e sustentável. A tecnologia

fotovoltaica tem apresentado avanços significativos, reduzindo custos e aumentando sua competitividade no mercado energético. Além disso, o sistema heliotérmico oferece uma alternativa viável, especialmente em regiões com alta incidência de radiação solar.

Outra opção promissora é o hidrogênio verde, que oferece a possibilidade de descarbonizar diversos setores da economia. A produção de hidrogênio por meio da eletrólise da água, utilizando eletricidade de fontes renováveis, representa uma solução sustentável e de baixa emissão de carbono. No entanto, é crucial investir em pesquisa e desenvolvimento para aprimorar essa tecnologia e torná-la mais acessível e eficiente.

A Petrobras, por exemplo, tem se destacado no cenário global com seu programa de captura, uso e armazenamento de carbono (CCUS), demonstrando um compromisso real com a redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE). Essa iniciativa não só contribui para mitigar os impactos ambientais, mas também melhora a eficiência da produção de petróleo, estabelecendo um modelo para uma indústria de baixa emissão de carbono.

Isto posto, a transição para uma matriz energética de baixo carbono requer um esforço conjunto de governos, indústrias e sociedade civil. É preciso investir em pesquisa, desenvolvimento e implementação de tecnologias sustentáveis, promover políticas públicas que incentivem a adoção de fontes renováveis de energia e criar um ambiente propício para a inovação e o empreendedorismo no setor energético. Somente assim poderemos enfrentar os desafios das mudanças climáticas e garantir um futuro sustentável para as gerações futuras.

5. PANORAMA DE ANÁLISES

5.1. A GRAVIDADE AMBIENTAL DEVIDO A CONJUNTURA DA MATRIZ ENERGÉTICA ATUAL PARA SOCIEDADE MODERNA E PARA AS FUTURAS GERAÇÕES

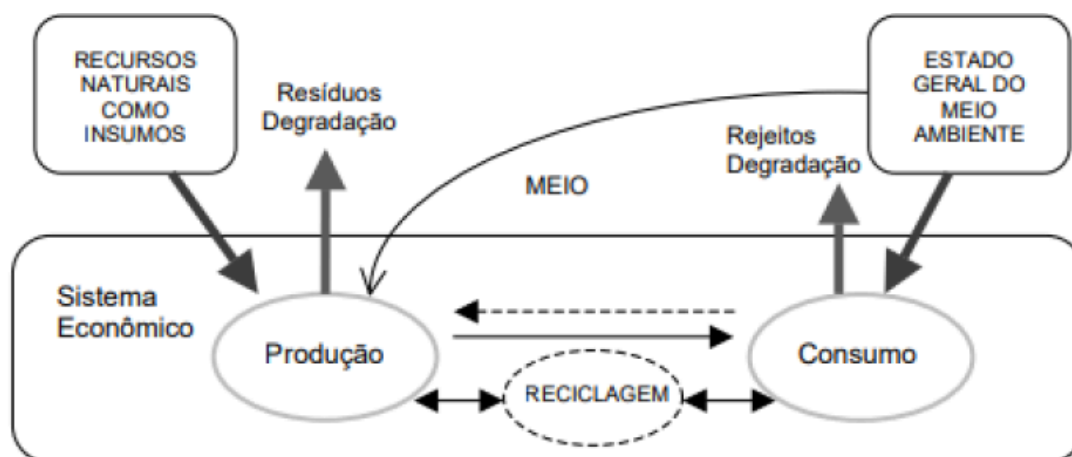
Em meados dos anos de 1970, a sustentabilidade era apenas um termo técnico que vinha sendo empregado apenas no meio acadêmico, admitindo a hipótese de que o ecossistema não perderia sua resiliência mesmo que fosse submetido a agressões dos seres humanos, visto que até mesmo a pesca nesta mesma época seguia a lógica do não comprometimento dos cardumes (Da Veiga, 2019).

Embora nos anos de 1980, quando a sustentabilidade propiciou definir o termo de desenvolvimento sustentável, até mesmo após a sua validação na Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, realizada em junho de 1992 no Rio de Janeiro, abriu espaço para um alvo de desconfiança. Tal ceticismo veio tanto dos defensores fervorosos dos mercados ultraliberais quanto de seus opositores, que temiam que as questões ambientais competissem com suas prioridades sociais. Diante disso, houve considerável

rejeição, tanto da direita quanto da esquerda (Da Veiga, 2019). De acordo com Tol. (2009), entre os problemas ambientais que ganharam maior destaque nas últimas décadas, a mudança climática global se sobressai como um dos mais sérios e desafiadores de enfrentar. Isso sugere que, entre todas as externalidades, a mudança climática é percebida como a mais significativa, complexa e incerta em comparação com outras questões ambientais.

Em um sistema que preza pela economia é observado como um ser vivo dentro desta sistemática, devido a sua complexidade e sua mutualidade com o conjunto natural. Dessa maneira, como a economia é uma parcela indivisível do meio ambiente, uma vez que são extraídos recursos da natureza no processo de produção, viabiliza o desenvolvimento de resíduos no ecossistema no pós consumo. Logo, considerar o meio ambiente apenas como fonte de materiais inesgotáveis e tratá-lo como reservatório de resíduos, torna-se um ideal simplista (Mueller, 2007).

Figura 4 - *Composição lógica do sistema econômico intrinsecamente ligado ao meio ambiente*



Fonte: MUELLER, 2007.

As atividades do sistema econômico são realizadas dentro de um espaço específico, ou seja, impactam diretamente os recursos naturais em todas as fases do crescimento econômico. Esse impacto é influenciado tanto pela escala e magnitude do sistema quanto pela maneira como ele se expande. Ainda assim, a ciência econômica se baseia nas decisões sobre a utilização desses recursos produtivos, que são limitados, na criação de bens e serviços para atender às necessidades humanas. Isto posto, segundo a lógica econômica, o sistema procura maximizar a produtividade dos recursos e aumentar sua oferta, enquanto as políticas econômicas têm a responsabilidade de controlar a produtividade do capital natural e os benefícios decorrentes (Vasconcellos; Garcia, 2012).

No ano de 1970, de acordo com o relatório “Os Limites do Crescimento Econômico” criado pelo Clube de Roma, foram analisado aspectos como tecnologia, população, nutrição, recursos naturais e meio ambiente, notando que caso as previsões da época continuassem conforme seguiam, iria sobrecarregar o sistema mundial, favorecendo o colapso. Mesmo que o “Limites do Crescimento” tenha sido muito criticado, ele tornou pública pela primeira vez a noção de limites externos – a ideia de que o desenvolvimento poderia ser limitado pelo tamanho finito dos recursos terrestres (Pnuma, 2004).

Para compreender as teorias econômicas relacionadas ao meio ambiente, é fundamental ter uma noção das bases que regem o funcionamento adequado dos mercados (Andrade, 2008). Embora, a eficiência econômica seja alcançada por meio da maximização simultânea dos excedentes tanto do consumidor quanto do produtor, por outro lado, caso os recursos da produção sejam alocados de maneira ineficaz, acarretará na falha do mercado (Pindyck; Rubinfeld, 2013). Diante disso, seguir com um procedimento de exploração sustentável dos recursos naturais, favorece o equilíbrio e a preservação ambiental, auxiliando no crescimento econômico de forma consciente (Oliveira; Ferreira, 2021).

De acordo com economistas da escola neoclássica, a lógica de mercado é a solução mais plausível para resolução dos problemas dos seres humanos, uma vez que os próprios mercados conduzem os agentes econômicos a buscarem soluções que potencializam os ganhos do setor privado. Entretanto, segundo a Teoria das Externalidades que ressalta a diferença entre os custos e benefícios da produção, evidenciando os prejuízos e ganhos sociais, encaminha para ineficiência do mercado, ao passo que exige uma reavaliação dos impactos (Talisz, 2022).

A definição de externalidade é dada a partir do impacto das ações por meio dos produtores, consumidores e entre ambos (Pindyck; Rubinfeld, 2013). Contudo, a presença de externalidades é resultado entre uma alocação sub-ótima de recursos, visto que os custos dessas externalidades não são considerados pelos agentes (Marshall, 1890). Desse modo, as consequências das atividades empresariais podem ser observadas na relação entre produção, consumo e uso dos bens públicos (Pigou, 1920).

Ademais, as externalidades são causadas com base sempre que um agente causar perda, ganho e até mesmo bem-estar a mais de um agente, desde que a perda e o ganho sejam contrabalançados no processo produtivo, isto é, posterior a seu uso. Adicionalmente a isso, as análises são fundamentais para o entendimento das interações entre atividade econômica e o meio ambiente, por toda extensão da cadeia produtiva, como também os impactos sobre a

cultura do consumismo e o ecossistema, através dos limites que possibilitam a regulação por parte de agentes públicos (Veiga Neto, 2018).

Adiante, externalidade positiva nada mais é do que o reflexo de um comportamento individual ou corporativo que tem um impacto positivo na sociedade como um todo, resultando em ganho de bem-estar como efeito colateral. De outra maneira, uma externalidade negativa ocorre quando as ações causam prejuízos a outros, com custos sociais ou efeitos negativos na natureza, afetando indivíduos direta ou indiretamente, a curto ou longo prazo (Talisz, 2022).

Mesmo que as externalidades negativas possam ser divididas em pecuniárias, uma vez que envolvam valores de terra e custos salariais, tecnológicas e inclusive ambientais, estas últimas abrangem poluição ambiental e concentração urbana (Kon, 1997). Sob outra perspectiva econômica, as mudanças climáticas são vistas como uma consequência da externalidade global negativa, alinhada com o modelo atual de desenvolvimento capitalista e uma ameaça constante ao bem público global (Cepal, 2019).

Por esse motivo, as externalidades ambientais negativas afetam o sistema econômico e impactam diretamente os seres humanos e o meio ambiente em que vivem, na maioria das vezes são originadas dos ciclos de vida de um produto, desde a extração das matérias-primas até o pós consumo. Contudo, essas externalidades negativas transcendem o tempo e as fronteiras territoriais, causando efeitos intergeracionais, como resíduos nos oceanos, emissões de gases de efeito estufa (GEE), extinção de espécies, desmatamento e aumento da temperatura. Sendo assim, as mudanças climáticas são causadas principalmente pelo acúmulo de gases de efeito estufa (GEE) que são emitidos pela humanidade desde a Revolução Industrial (Oliveira; Ferreira, 2021).

5.2. CONSCIÊNCIA DA SUSTENTABILIDADE BASEADA NOS LIMITES DE CRESCIMENTO ECONÔMICO IMPULSIONADO PELOS PROBLEMAS DAS EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA (GEE)

Em conformidade com a concepção de que tenha um juízo final, segundo Perman, McGilvray e Common (1999), não há restrições ao crescimento e ao comportamento econômico. Por consequência, o conceito se baseia nas ideias de processos e instituições, sugerindo que os objetivos ambientais não podem ser separados dos objetivos políticos, sociais e econômicos, como a erradicação da pobreza. Contudo, a sustentabilidade, nesta conjuntura, depende da construção de uma consciência, que deve surgir por meio de negociações sobre os processos de escolha social das ações a serem permitidas, e por sua vez executadas. Portanto, essa abordagem julga dois modelos tradicionais, como a noção de que

as sociedades humanas são parte do ecossistema e que suas ações devem ser controladas por leis para evitar ultrapassar os limites ecológicos, uma vez que as estratégias tradicionais são consideradas insuficientes, pois dependem do convencimento dos indivíduos sobre a capacidade ambiental. E por outro lado, a prática de quantificar as perdas e danos ambientais como custos externos, para que possam ser incorporados ao sistema de preços. Logo, esta abordagem é falha porque tende a superestimar a capacidade de medir e avaliar em contextos sociais complexos (Canelas, 2005).

Mesmo com as premissas do setor privado, diversas políticas públicas têm sido implementadas para lidar com as preocupações globais sobre as externalidades ambientais dos gases de efeito estufa, com o objetivo de frear as mudanças climáticas (Olsson; Kruger, 2021). Porém, com a indispensável complexidade da cadeia produtiva, a mudança climática é um problema ambiental complexo e difícil de administrar, com um impacto forte e duradouro, visto que alguns gases de efeito estufa (GEE) se fixando na atmosfera perdurando por séculos (IPCC, 2018; Tol, 2009).

Além do mais, a ligação entre sustentabilidade e emissões de gases de efeito estufa ficou ainda mais evidente com a criação do Protocolo de Kyoto, em 1997, que estabeleceu metas de redução de emissões para os países desenvolvidos que assinaram o acordo. O dióxido de carbono (CO_2), por sua vez, é o principal poluente responsável pelo aquecimento global e o mais importante gás de efeito estufa. Dessa maneira, o CO_2 é essencial para a fotossíntese, um processo vital para a manutenção da vida, e é produzido por diversas atividades, como a combustão de carvão e hidrocarbonetos, a fermentação de líquidos e a respiração de humanos e animais (Talisz, 2022).

Ao considerar que as emissões de gases de efeito estufa GEE estão cada vez mais aumentando nas taxas atuais, à vista disso, a temperatura global pode subir 5,4°C até 2100. Apesar disso, como resultado a curto prazo seria a elevação do nível do mar e em impactos significativos nas regiões costeiras ao redor do mundo (Embrapa, 2022). Dessa maneira, os efeitos das mudanças climáticas na economia brasileira poderiam resultar em uma redução do PIB entre 0,5% e 2,3% até 2050, dependendo do cenário mais otimista ou pessimista (Margulis; Dubeux, 2011). Por esse motivo, o crescimento contínuo das emissões de gases de efeito estufa às taxas atuais ou superiores levará a um aumento da temperatura global e a mudanças climáticas significativas durante o século XXI, que provavelmente serão mais intensas do que as observadas no século XX (IPCC, 2007).

5.3. CONSIDERAÇÕES

Em um mundo onde a interconexão entre desenvolvimento econômico e preservação ambiental se torna cada vez mais evidente, a importância de uma abordagem sustentável se destaca como imperativa para garantir o bem-estar das gerações presentes e futuras. Logo, a análise nos permitiu compreender a gravidade ambiental associada à matriz energética atual e seus impactos sobre a sociedade moderna e as futuras gerações.

Ao revisitar as origens do conceito de sustentabilidade, desde sua concepção nos anos 70 até sua consolidação como princípio fundamental nas agendas globais, foi possível observar uma evolução significativa na percepção e compreensão dos desafios ambientais enfrentados pela humanidade. A emergência da mudança climática global como um dos problemas mais sérios e complexos demonstra a necessidade premente de ações decisivas para mitigar seus efeitos prejudiciais.

A análise das externalidades associadas às atividades econômicas revela a complexidade da relação entre economia e meio ambiente, destacando a importância de uma abordagem holística que leve em consideração não apenas os aspectos econômicos, mas também os sociais e ambientais. A compreensão das limitações dos modelos econômicos tradicionais e a necessidade de políticas públicas eficazes para lidar com as externalidades ambientais são pontos cruciais para avançarmos em direção a um modelo de desenvolvimento mais sustentável.

Diante do exposto, é fundamental reconhecer a urgência de ações concretas para enfrentar os desafios ambientais e promover um desenvolvimento sustentável. A implementação de estratégias de mitigação das emissões de gases de efeito estufa e a adoção de políticas que incentivem a transição para fontes de energia limpa são passos essenciais para garantir a preservação dos recursos naturais e a proteção do meio ambiente para as futuras gerações.

Em última análise, este trabalho ressalta a importância de uma mudança de paradigma em direção a um modelo econômico mais consciente e sustentável, no qual o crescimento econômico esteja alinhado com a preservação ambiental e o bem-estar humano. Somente através de uma abordagem integrada e colaborativa, que envolva governos, empresas e a sociedade civil, poderemos construir um futuro mais resiliente e sustentável para todos.

6. ARGUMENTAÇÃO

6.1. IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS E CRISES AMBIENTAIS

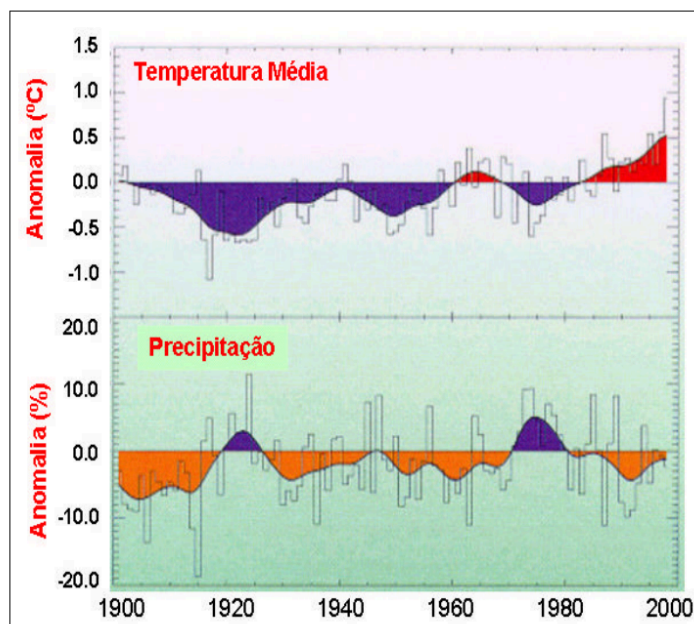
Persistindo o atual ritmo de emissões de gases de efeito estufa na atmosfera provenientes de atividades humanas, é altamente provável que ocorram mudanças climáticas

globais significativas nos próximos cem anos. Entretanto, essas mudanças incluem aumento de temperatura, alterações nos padrões de precipitação e modificações na distribuição de eventos climáticos extremos, como secas, inundações, ondas de frio, geadas, tempestades severas e granizo. Evidências científicas recentes sugerem uma intensificação da variabilidade climática associada aos fenômenos El Niño e La Niña devido ao aumento do efeito estufa. Diante disso, o aumento previsto do nível médio do mar pode ter impactos significativos nos ecossistemas e nas populações humanas que habitam áreas costeiras e ribeirinhas sujeitas à influência das marés (Nobre, 2014).

No cenário brasileiro, as análises das tendências de temperatura indicam um leve aumento das temperaturas superficiais do ar ao longo do século XX, em consonância com o aquecimento global observado no planeta. Ainda assim, quanto às precipitações, não há evidências claras de mudança significativa, mas sim uma variabilidade climática observada em escalas interanuais e interdecadais. Logo, essa variabilidade está relacionada às interações entre os oceanos tropicais e a atmosfera, sendo o fenômeno El Niño e La Niña o exemplo mais conhecido (Nobre, 2014).

Além disso, para estimar as possíveis mudanças climáticas globais até o ano 2100, são comumente utilizados modelos climáticos globais. Esses modelos geram cenários de alterações climáticas consistentes com diferentes níveis de emissões de gases de efeito estufa. Vários centros meteorológicos avançados empregam modelos climáticos complexos para realizar simulações desse tipo (Nobre, 2014). Conforme mostrado na (**Figura 5**), observa-se a variação da temperatura média anual e da precipitação no Brasil entre 1901 e 1998, em relação às médias do período de 1961-1990.

Figura 5 - *Variação da temperatura média anual, 1901-1998 (painel superior), e da precipitação anual, 1901-1998 (painel inferior), no Brasil. A variação é relativa às médias do período 1961-90 (com valores médios de 25,0°C e 1780mm).*



Fonte: HULME, M. E SHEARD, N; 1999.

Basicamente, o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) concluiu estudos sobre cenários de emissões e elaborou cenários de alterações climáticas para diversas regiões do planeta, incluindo o norte e o sul da América do Sul, com base em simulações realizadas por diferentes modelos climáticos globais (Nobre, 2014).

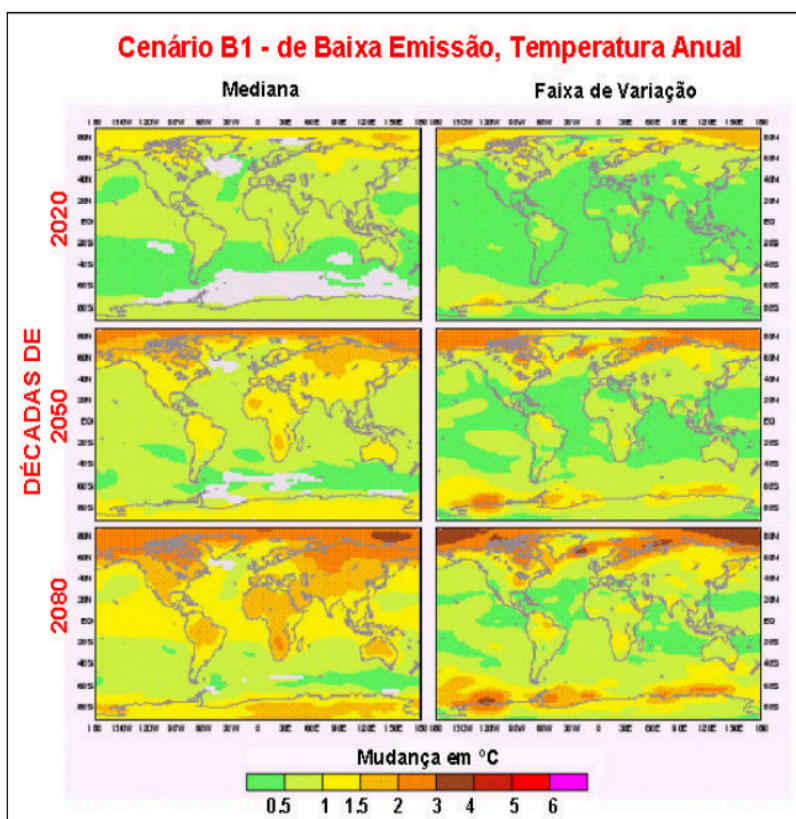
Um estudo conduzido pelo IPCC sobre os possíveis rumos das emissões futuras delineou diversas trajetórias socioeconômicas para o desenvolvimento global ao longo do século XXI. De acordo com essas perspectivas que foram delineadas por Carter e Hulme, destacam-se quatro cenários principais identificados como B1, B2, A1 e A2. As variações nas emissões de gases de efeito estufa (GEE) até o ano 2100, em comparação com os níveis de 2000, abrangem desde uma redução de 4% (no cenário B1, de baixas emissões) até um aumento máximo de 320% (no cenário A2, de altas emissões, representando uma trajetória próxima ao que se considera "business-as-usual", onde as emissões seguem aumentando como nas décadas anteriores) (Nobre, 2014).

Desse modo, resulta em um aumento na concentração atmosférica de CO_2 , projetada para cerca de 550 partes por milhão em volume (ppmv) até o ano 2100 no cenário B1 e para mais de 830 ppmv no cenário A2, aproximadamente três vezes maior do que os níveis pré-industriais de cerca de 280 ppmv. As concentrações de outros gases de efeito estufa,

como CH_4 , N_2O e O_3 troposférico, também aumentam nesses cenários. Os cenários restantes (B2 e A1) apresentam características intermediárias entre os extremos de baixa e alta emissão (Nobre, 2014).

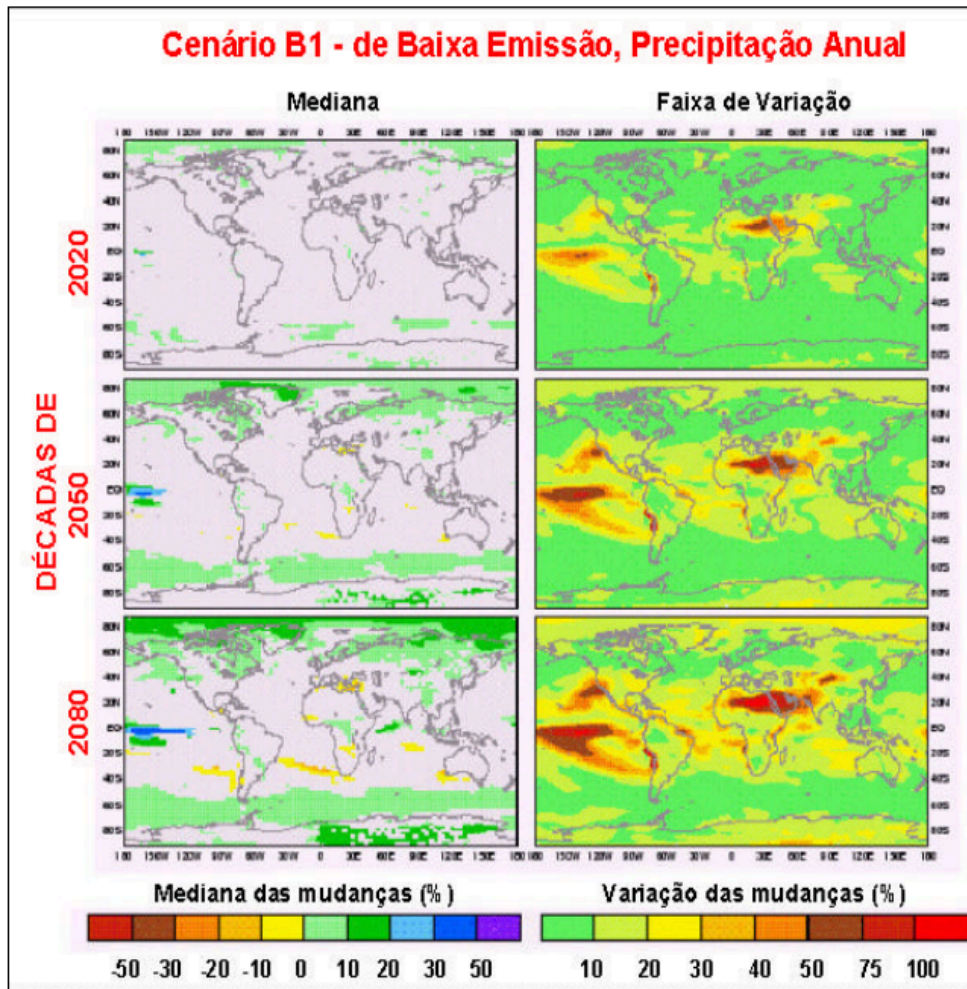
Quanto às projeções específicas para a América do Sul, conforme ilustrado nas Figuras 3 a 9 do estudo do IPCC, observa-se, de forma geral, um aumento na temperatura até o ano 2080, variando de aproximadamente 1°C (no cenário B1, de baixa emissão) a mais de 6°C para o norte e cerca de 4°C para o sul da região (no cenário A2, de alta emissão). Quanto à precipitação, há uma significativa incerteza. As diferentes simulações numéricas não chegam a um consenso. Para os trimestres MAM, JJA e SON no norte da América do Sul, algumas simulações apontam para um aumento da precipitação, enquanto outras indicam redução. Somente para o trimestre DJF, há uma predominância de simulações que sugerem aumento na precipitação. Em termos de magnitude, as mudanças na precipitação variam entre 0 e $\pm 3\%$ no cenário B1 e entre 0 e $\pm 10\%$ (podendo chegar a +15% no trimestre MAM) no cenário A2 até o ano 2080 (Nobre, 2014).

Figura 6 - Caracterização das mudanças de temperatura anual com relação a média do período 1961-90 para o cenário B1 de baixa emissão. Mapas para as décadas de 2020 (superior), 2050 (meio) e 2080 (inferior). Dessa forma, os painéis à esquerda mostram as mudanças medianas a partir de resultados de 10 Modelos Climáticos Globais (MCG).



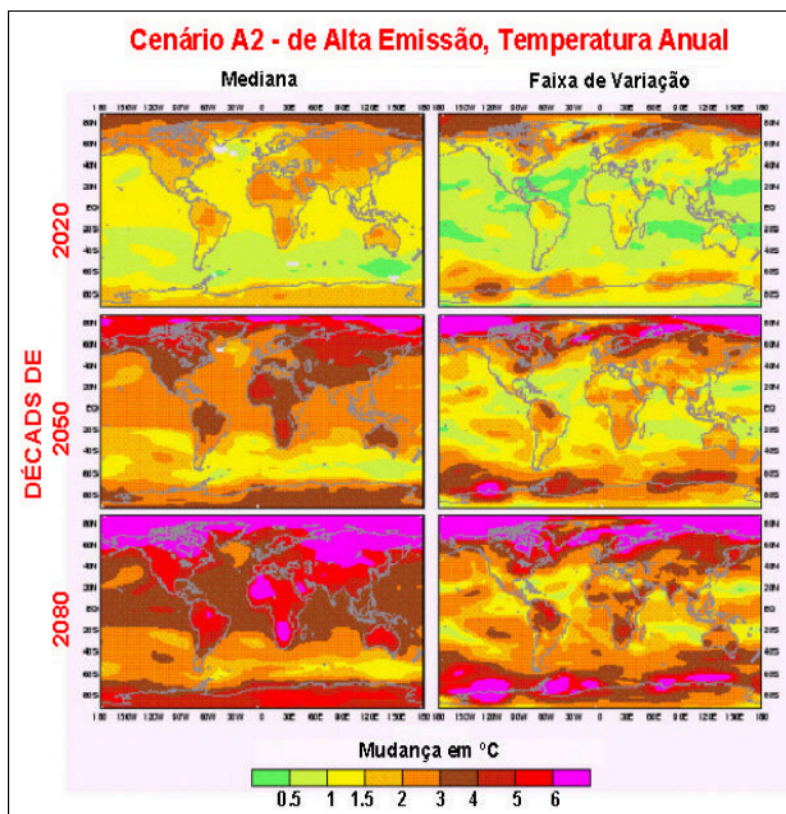
Fonte: CARTER E HULME, 2000.

Figura 7 - Caracterização das mudanças de precipitação anual com relação a média do período 1961-90 para o cenário B1 de baixa emissão. Mapas para as décadas de 2020 (superior), 2050 (meio) e 2080 (inferior). Logo, os painéis à esquerda mostram as mudanças medianas a partir de resultados de 10 Modelos Climáticos Globais (MCG). Já, os painéis à direita mostram a faixa de variação dos resultados dos diferentes MCG.



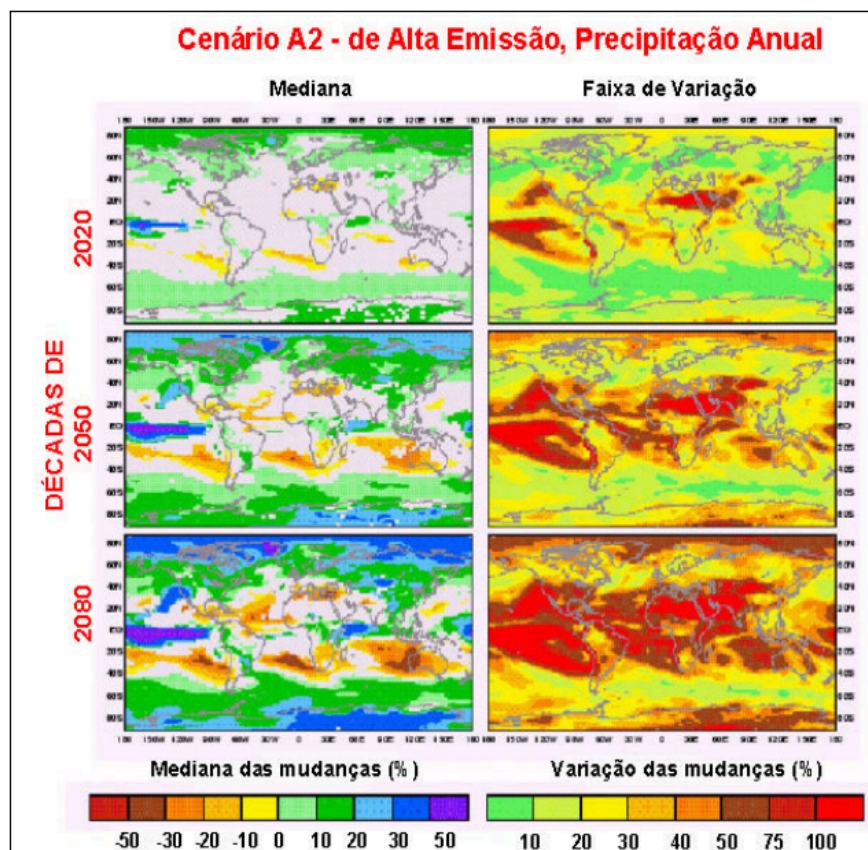
Fonte: CARTER E HULME, 2000.

Figura 8 - Caracterização das mudanças de temperatura anual com relação a média do período 1961-90 para o cenário A2 de alta emissão. Mapas para as décadas de 2020 (superior), 2050 (meio) e 2080 (inferior). Contudo, os painéis à esquerda mostram as mudanças medianas a partir de resultados de 10 Modelos Climáticos Globais (MCG). Por outro lado, os painéis à direita mostram a faixa de variação dos resultados dos diferentes MCG.



Fonte: CARTER E HULME, 2000.

Figura 9 - Caracterização das mudanças de precipitação anual com relação a média do período 1961-90 para o cenário A2 de alta emissão. Mapas para as décadas de 2020 (superior), 2050 (meio) e 2080 (inferior). Todavia, os painéis à esquerda mostram as mudanças medianas a partir de resultados de 10 Modelos Climáticos Globais (MCG). Por outro lado, os painéis à direita mostram a faixa de variação dos resultados dos diferentes MCG.



Fonte: CARTER E HULME, 2000.

Diante do exposto, é inegável a urgência de ações efetivas para mitigar os impactos das mudanças climáticas projetadas para o futuro. No entanto, os dados indicam não apenas um aumento significativo na temperatura global, mas também alterações complexas nos padrões de precipitação e na ocorrência de eventos climáticos extremos. Dessa maneira, a utilização de modelos climáticos globais e os cenários delineados pelo IPCC oferecem ideias valiosas sobre os possíveis desdobramentos futuros, destacando a importância de adotar medidas que reduzam as emissões de gases de efeito estufa (GEE) e fortaleçam a resiliência das comunidades vulneráveis. Portanto, a implementação de políticas sustentáveis, investimentos em energia limpa e ações de adaptação são essenciais para enfrentar os

desafios impostos pelas mudanças climáticas e garantir um futuro mais seguro e sustentável para as gerações presentes e futuras (Nobre, 2014).

6.2. CONSIDERAÇÕES

Os desafios apresentados pelas mudanças climáticas e crises ambientais são inegáveis e demandam ações imediatas e efetivas. Portanto, a análise dos impactos projetados para o futuro, conforme delineado por estudos científicos e modelos climáticos globais, revela um panorama preocupante, com previsões de aumento significativo na temperatura global, mudanças nos padrões de precipitação e ocorrência de eventos climáticos extremos.

É essencial reconhecer a urgência dessas questões e agir de forma proativa para mitigar os impactos negativos sobre os ecossistemas e as comunidades humanas, especialmente aquelas mais vulneráveis. A adoção de políticas sustentáveis, o incentivo ao uso de energias limpas e investimentos em medidas de adaptação são passos fundamentais na construção de um futuro mais seguro e sustentável.

Nessa circunstância, as informações fornecidas pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) e outros órgãos científicos desempenham um papel crucial, fornecendo diretrizes para a tomada de decisões informadas e eficazes. No entanto, é importante ressaltar que a implementação dessas medidas requer não apenas ações a nível global, mas também a mobilização de governos, empresas, sociedade civil e indivíduos em todos os níveis.

Em virtude dos fatos mencionados, devido a urgência e complexidade dos desafios ambientais, é decisivo que as partes interessadas colaborem de forma coordenada e comprometida, visando a preservação do meio ambiente e a promoção de um desenvolvimento sustentável que garanta o bem-estar das gerações presentes e futuras. Somente através de esforços conjuntos e compromisso coletivo será possível enfrentar efetivamente os desafios impostos pelas mudanças climáticas e construir um futuro mais resiliente e equitativo para todos.

7. CONCLUSÃO

Perante o exposto, após examinar profundamente a complexidade da matriz energética global e, mais especificamente, da indústria de petróleo e gás natural, é possível concluir que estamos diante de um momento crucial na história da humanidade. As transições energéticas que testemunhamos ao longo dos séculos, desde a Revolução Agrícola até chegar nos dias atuais, e a busca por fontes de energia de baixo carbono, refletem não apenas avanços tecnológicos, mas também transformações sociais, econômicas e ambientais profundas.

Ademais, a necessidade premente de uma transição para uma matriz energética de baixo carbono é indiscutível, dadas as consequências cada vez mais evidentes das mudanças climáticas e da crescente demanda por energia em todo o mundo. O presente trabalho, oferece uma visão abrangente das complexidades envolvidas nesse processo, desde os desafios tecnológicos até os dilemas econômicos e políticos.

Ao explorar as diferentes formas de energia, desde a solar até o hidrogênio verde, e discutir os mecanismos de mercado e as políticas públicas necessárias para promover uma transição energética eficiente, permitiu que este trabalho pudesse lançar luz sobre as oportunidades e os obstáculos que enfrentamos.

No entanto, a mudança para uma matriz energética de baixo carbono exigirá não apenas inovação tecnológica, mas também uma mudança fundamental na forma como concebemos e gerenciamos nosso sistema energético. Logo, isso requer não apenas investimentos em pesquisa e desenvolvimento, mas também uma colaboração estreita entre governos, empresas e sociedade civil.

À vista disso, este trabalho oferece uma visão abrangente e perspicaz das questões envolvidas na transição energética global e destaca a importância de abordá-las de forma colaborativa e holística. Ao mesmo tempo em que reconhece os desafios e as críticas enfrentadas por essa indústria, também reconhece seu potencial para impulsionar a inovação e liderar a transformação para uma economia de baixo carbono.

Em consideração a isso, a transição para uma matriz energética de baixo carbono é, sem dúvida, um dos desafios mais urgentes e importantes de nosso tempo, e este trabalho poderá contribuir para o entendimento e a busca de soluções para esse desafio crítico e auxiliará no preenchimento de lacunas na literatura acadêmica brasileira sobre a transição energética, fornecendo informações relevantes para pesquisas futuras e discussões no campo da energia e meio ambiente.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, Luciane Martins de. Desenvolvimento Sustentável: Estudo de impacto ambiental e estudo de impacto de vizinhança. Curitiba: Letra da Lei, 2008.

CANELAS, ANDRÉ. 3º CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETRÓLEO E GÁS. A EVOLUÇÃO DO CONCEITO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E SUAS INTERAÇÕES COM AS POLÍTICAS ECONÔMICA, ENERGÉTICA E AMBIENTAL, [s. l.], 2005.

CENTRO BRASILEIRO DE RELAÇÕES INTERNACIONAIS (CEBRI), BANCO INTERAMERICANO DE DESENVOLVIMENTO (BID) E EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). 2022. Tendências e Incertezas da Transição Energética no caso brasileiro. Disponível em: <https://www.cebri.org/media/documentos/arquivos/PTE_Whitepaper_21dez_PT.pdf>.

DA VEIGA, JOSÉ ELI. Sustentabilidade: A LEGITIMAÇÃO DE UM NOVO VALOR. [S. l.: s. n.], 2019.

DELGADO, Fernanda; FILGUEIRAS, Raquel. A crise do setor de óleo e gás e os desafios da transição energética brasileira. A crise do setor de óleo e gás e os desafios da transição energética brasileira, [S. l.], p. 36-39, 1 abr. 2022.

DOS SANTOS, Gabriela. Transição Energética na Indústria de Óleo e Gás. Um olhar sobre a Petrobras, [s. l.], 1 jun. 2021.

DOS SANTOS, Cintia; BRAGA, Amabilym; DOS SANTOS, Jordan; DE OLIVEIRA, Milena; MADUREIRA, Moisés. A indústria do petróleo e energia. Frente aos novos desafios de se inserir nos modelos da transição energética, [s. l.], 14 jul. 2022.

DUARTE, Rhian. TRANSIÇÃO ENERGÉTICA. AS ESCOLHAS GOVERNAMENTAIS NO BRASIL E NO MUNDO PARA O PLANEJAMENTO ENERGÉTICO NO CONTEXTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS E AQUECIMENTO GLOBAL, [s. l.], 1 jan. 2013.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (Brasil). RELEVÂNCIA DO SETOR DE PETRÓLEO E GÁS NATURAL PARA A TRANSIÇÃO ENERGÉTICA. Descarbonização das atividades de refino de petróleo, [s. l.], 1 abr. 2024.

FONSECA, Henrique; PARMA, Eduardo; PERAÇA, Carina; BARROS, Letícia. TRANSIÇÃO ENERGÉTICA. DESAFIOS E OPORTUNIDADES, [s. l.], 12 set. 2022.

FRIGO, Murilo; CANEPPELE, Fernando; GODINHO, Emmanuel. A TRANSIÇÃO ENERGÉTICA SOB UMA PERSPECTIVA CRÍTICA. Revista Eletrônica Multidisciplinar de Investigação Científica, [s. l.], v. Volume 2, ed. 1, 15 fev. 2023.

GOVERNO FEDERAL (Brasil). Empresa de Pesquisa Energética. O PAPEL DO SETOR DE PETRÓLEO E GÁS NATURAL NA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA: O setor de O&G na Era da Transição Energética. In: O PAPEL DO SETOR DE PETRÓLEO E GÁS NATURAL NA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA. [S. l.], Abril 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-809/Sum%C3%A1rio%20Executivo%20-%20O%20papel%20do%20OG%20na%20Transi%C3%A7%C3%A3o%20Energ%C3%A9tica.pdf>. Acesso em: 1 maio 2024.

IEA. 2023. The Oil and Gas Industry in Net Zero Transitions. Disponível em <https://www.iea.org/reports/the-oil-and-gas-industry-in-net-zero-transitions#downloads>. Acesso em 06 mar 24.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). 2023. World Energy Outlook 2023. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/614bb748-dc5e-440b966a-adae9ea022fe/WorldEnergyOutlook2023.pdf>.

IRIGARAY, H. A. R.; STOCKER, F. ESG: novo conceito para velhos problemas. Cadernos EBAPE BR, v. 20, n. 4, p. 1–4, 2022.

MUELLER, C. C. Os economistas e as relações entre o sistema econômico e o meio ambiente. 1ª Ed. Editora UnB. Brasília, 2007

NOBRE, CARLOS A. Modelos e cenários para a Amazônia: o papel da ciência. Mudanças climáticas globais: possíveis impactos nos ecossistemas do país, [s. l.], 2014.

Paixão M. A. S. & Miranda S. H. G.(2018)Um comparativo entre a política de energia renovável no Brasil e na China. Pesquisa & Debate. Revista do Programa de Estudos Pós-Graduados em Economia Política.

PETROBRAS, AGÊNCIA. CCUS: Saiba o que é CCUS e descubra tudo sobre o maior programa de captura, uso e armazenamento de CO₂ do mundo, mantido pela Petrobras. In: CCUS. [S. l.], 27 dez. 2023. Disponível em: <https://agencia.petrobras.com.br/w/ccus#:~:text=O%20programa%20de%20captura%2C%20uso,o%20pioneiro%20em%20%C3%A1guas%20ultraprofundas>. Acesso em: 3 jun. 2024.

PHILIBERT, C., FRANKL, P., DOBROTKOVA, Z. Technology roadmap: Concentrating Solar Power. International Energy Agency (IEA), 2010. Disponível em: http://www.iea.org/papers/2010/csp_roadmap.pdf.

SÁ, L. R. V. DE; CAMMAROTA, M. C.; FERREIRA-LEITÃO, V. S. Hydrogen production by anaerobic fermentation - general aspects and possibility of using Brazilian Agro-industrial wastes. *Quimica nova*, 2014.

SACHS, Ignacy (1985) Ecodesenvolvimento: Crescer sem Destruir, São Paulo: Editora Vértice.

SAUER, I. L. O pré-sal e a geopolítica e hegemonia do petróleo face às mudanças climáticas e à transição energética. Disponível em: https://www.seesp.org.br/site/images/Recursos_Minerais_Ildo_Sauer_1.pdf. Acesso em: 28 abr. 2024.

SCHWAB, Klaus. A quarta revolução industrial. In: A QUARTA revolução industrial. [S. l.: s. n.], 2016.

SHAH, S. A. A. et al. 2021. Energy trilemma based prioritization of waste-to-energy technologies: Implications for post-COVID-19 green economic recovery in Pakistan. *Journal of Cleaner Production*, v. 8, 15 February 2021, p. 124729.

SMETS, A. et al. (2016). Solar Energy: The physics and engineering of photovoltaic conversion, technologies and systems. UIT Cambridge.

SUZIGAN, KELLY. A TRANSIÇÃO PARA UMA MATRIZ ENERGÉTICA LIMPA: OS AVANÇOS NA TECNOLOGIA SOLAR. A TRANSIÇÃO PARA UMA MATRIZ ENERGÉTICA LIMPA: OS AVANÇOS NA TECNOLOGIA SOLAR, [s. l.], p. 30-31, 2015.

TALISZ, GIOVANA. ECONOMIA DE BAIXO CARBONO: UMA ALTERNATIVA SUSTENTÁVEL PARA A EXPANSÃO DA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA. 2022. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Ciências Econômicas da Faculdade de Ciências Econômicas e Bacharel em Economia) - UFRGS, [S. l.], 2022.

TOL, R. The economic effects of climate change. *Journal of Economic Perspective*, 23 (2): 29-51. DOI: 10.1257/jep.23.2.29. 2009. Disponível em: <https://www.aeaweb.org/articles?id=10.1257/jep.23.2.29>

ZHENG, C.; KAMMEN, D. M. “An innovation-focused roadmap for a sustainable global photovoltaic industry”. *Energy Policy*, n. 67, 2014, p. 159-169.

WONG, C. Y.; MOHAMAD, Z. F.; A, KENG, Z. X.; AZIZAN, S. A. Examining the patterns of innovation in low carbon energy science and technology: Publications and patents of 121 Asian emerging economies. *Energy Policy*, n. 73, 2014, p. 789–802.