

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE CAMPINAS

Leticia Migot Moretti

**INDÚSTRIA PETROLÍFERA EM TEMPOS DE TRANSIÇÃO ENERGÉTICA:
CAMINHOS PARA A SUSTENTABILIDADE**

CAMPINAS

2025

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE CAMPINAS

ESCOLA DE ECONOMIA E NEGÓCIOS

Curso de Ciências Econômicas

Leticia Migot Moretti

**INDÚSTRIA PETROLÍFERA EM TEMPOS DE TRANSIÇÃO ENERGÉTICA:
CAMINHOS PARA A SUSTENTABILIDADE**

Monografia apresentada à Escola de Economia e Negócios, Pontifícia Universidade Católica de Campinas (PUC Campinas), como parte das exigências para a obtenção do título de bacharel em Ciência Econômicas.

Orientador: Prof. Dr. Izaias de Carvalho Borges

CAMPINAS

2025

Sistema de Bibliotecas e Informação - SBI
Gerador de fichas catalográficas da Universidade PUC-Campinas
Dados fornecidos pelo(a) autor(a).

M844i	<p>Migot Moretti, Leticia</p> <p>INDÚSTRIA PETROLÍFERA EM TEMPOS DE TRANSIÇÃO ENERGÉTICA: CAMINHOS PARA A SUSTENTABILIDADE / Leticia Migot Moretti. - Campinas: PUC-Campinas, 2025.</p> <p>55 f.il.</p> <p>Orientador: Izaias de Carvalho Borges .</p> <p>TCC (Bacharelado em Ciências Econômicas) - , Escola de Economia e Negócios, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2025. Inclui bibliografia.</p> <p>1. Petróleo. 2. Transição Energética. 3. Inivação. I. de Carvalho Borges , Izaias . II. Pontifícia Universidade Católica de Campinas. Escola de Economia e Negócios. . III. Título.</p>
-------	--

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE CAMPINAS

ESCOLA DE ECONOMIA E NEGÓCIOS

Curso de Ciências Econômicas

Leticia Migot Moretti

**INDÚSTRIA PETROLÍFERA EM TEMPOS DE TRANSIÇÃO ENERGÉTICA:
CAMINHOS PARA A SUSTENTABILIDADE**

Monografia defendida e aprovada em 01 de dezembro de 2025 pela comissão examinadora:

Prof. Dr. Izaias de Carvalho Borges
Orientador e presidente da comissão examinadora.
Pontifícia Universidade Católica de Campinas

Prof. Dr. Candido Ferreira da Silva Filho
Pontifícia Universidade Católica de Campinas

CAMPINAS

2025

Dedico esta monografia à minha mãe, que me ensinou o valor de ser autêntica e fiel a quem sou.

Ao meu pai, que me encorajou a perseguir meus sonhos com coragem e esperança.

Aos meus amigos, por estarem ao meu lado em cada passo do caminho.

E em especial à Dona Mercedes, exemplo de força, que me inspira a ser sempre a melhor versão de mim.

“A civilização moderna foi construída sobre o petróleo,
mas a sustentabilidade do futuro exigirá a construção
de uma nova base energética.”

Lester R. Brown

RESUMO

Esta monografia analisa a indústria do petróleo em tempos de transição energética, buscando compreender como esse setor, historicamente central para o desenvolvimento econômico e tecnológico, pode alinhar-se a uma trajetória de economia sustentável. Com base em revisão bibliográfica e análise documental de relatórios e bases estatísticas, o Capítulo I discute a formação e a consolidação da indústria petrolífera, sua estrutura produtiva marcada por elevada concentração e integração vertical, o papel predominante da inovação de processo e as diferenças entre a matriz energética mundial, ainda fortemente dependente de combustíveis fósseis, e a matriz brasileira, mais intensiva em fontes renováveis. O Capítulo II aprofunda os aspectos econômicos da atividade petrolífera, examinando a evolução e a geografia da demanda, a configuração da oferta global, o papel de empresas estatais e grandes corporações, bem como a estrutura de custos de exploração, desenvolvimento e produção, evidenciando como riscos geológicos, volatilidade de preços e disputas geopolíticas condicionam investimentos e estratégias empresariais. O Capítulo III discute a economia sustentável e as estratégias de redução de danos na indústria do petróleo, abordando os impactos ambientais ao longo de toda a cadeia de valor, as oportunidades de mitigação por meio de melhorias operacionais, gestão de emissões e resíduos, e a integração gradual de tecnologias e fontes sustentáveis, como energias renováveis, biocombustíveis e soluções de captura e armazenamento de dióxido de carbono, além do papel de políticas públicas, regulação e instrumentos econômicos na orientação dos investimentos privados. Conclui-se que a indústria do petróleo tende a permanecer relevante nos curto e médio prazos, mas sua legitimidade econômica e social dependerá da capacidade de reduzir emissões, diversificar portfólios e contribuir de forma efetiva para uma transição energética justa e de baixo carbono.

Palavras-chave: indústria do petróleo; inovação tecnológica; demanda e oferta de petróleo; custos de produção; economia sustentável; transição energética; impactos ambientais; tecnologias de baixo carbono.

ABSTRACT

This monograph analyzes the oil industry in times of energy transition, seeking to understand how this sector, historically central to economic and technological development, can align itself with a path toward a sustainable economy. Based on bibliographic review and documentary analysis of reports and statistical databases, Chapter I discusses the formation and consolidation of the oil industry, its productive structure marked by high concentration and vertical integration, the predominant role of process innovation, and the differences between the global energy matrix, still heavily dependent on fossil fuels, and the Brazilian matrix, which relies more on renewable sources. Chapter II delves into the economic aspects of oil activity, examining the evolution and geography of demand, the configuration of global supply, the role of state-owned and large multinational corporations, as well as the structure of exploration, development, and production costs, highlighting how geological risks, price volatility, and geopolitical disputes influence investments and business strategies. Chapter III discusses the sustainable economy and damage reduction strategies within the oil industry, addressing environmental impacts throughout the entire value chain, opportunities for mitigation through operational improvements, emissions and waste management, and the gradual integration of sustainable technologies and energy sources such as renewables, biofuels, and carbon capture and storage solutions, in addition to the role of public policies, regulation, and economic instruments in guiding private investment. It concludes that the oil industry is likely to remain relevant in the short and medium term, but its economic and social legitimacy will depend on its ability to reduce emissions, diversify its portfolio, and effectively contribute to a fair, low-carbon energy transition.

Keywords: oil industry; technological innovation; oil demand and supply; production costs; sustainable economy; energy transition; environmental impacts; low-carbon technologies.

SUMÁRIO

Introdução.....	9
CAPÍTULO I. A Indústria Do Petróleo, Inovação E Economia Sustentável.....	12
1.1 A Indústria do Petróleo e a Economia Industrial.....	14
1.2 Inovações de Processo na Indústria do Petróleo.....	19
1.3 A Importância do Petróleo na Balança Energética.....	22
1.4 Matriz Energética e Suas Mudanças.....	26
CAPÍTULO II – A Indústria Petrolífera: Aspectos econômicos.....	30
2.1 Demanda do Petróleo.....	31
2.2 Oferta do Petróleo.....	32
2.3 O Custo do Petróleo.....	34
CAPÍTULO III – ECONOMIA SUSTENTÁVEL: ESTRATÉGIAS DE REDUÇÃO DE DANOS NA INDÚSTRIA PETROLÍFERA.....	37
3.1 Os impactos ambientais no setor do petróleo.....	39
3.2 Mitigação dos Impactos e a Longevidade do Uso do Petróleo.....	43
3.3 – Tecnologias e Fontes Sustentáveis.....	46
Conclusão.....	50
Bibliografia.....	53

INTRODUÇÃO

A indústria petrolífera ocupa papel central na consolidação do modelo econômico e industrial contemporâneo, sendo base energética essencial para o crescimento da infraestrutura, da mobilidade e da produção global. No entanto, sua dependência de recursos fósseis e a consequente emissão de gases de efeito estufa a colocam em conflito direto com os princípios da economia sustentável e com as metas ambientais globais, como os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da Agenda 2030 das Nações Unidas. Essa contradição entre relevância econômica e impacto socioambiental faz do setor petrolífero um dos principais focos de debate acerca da transição energética e da necessidade de reconfiguração dos sistemas produtivos em escala mundial.

Nas últimas décadas, a emergência climática e o avanço das tecnologias de energia limpa têm pressionado empresas e governos a repensarem suas práticas produtivas. Nesse contexto, a indústria do petróleo enfrenta o desafio de se reconfigurar estrategicamente, aproximando-se de princípios sustentáveis por meio da adoção de inovações tecnológicas, da melhoria da eficiência operacional e da adequação a regulamentações ambientais cada vez mais rigorosas. O debate atual, portanto, vai além da simples substituição dos combustíveis fósseis, buscando compreender como o próprio setor pode mitigar seus impactos ambientais e contribuir, ainda que de forma transitória, para uma economia de baixo carbono.

Esta monografia tem como objetivo compreender de que maneira a indústria do petróleo pode se aproximar de práticas mais sustentáveis e como as inovações tecnológicas vêm moldando a transformação do setor. A pesquisa parte de uma visão ampla sobre a estrutura e o funcionamento da indústria, avança para a análise das transformações tecnológicas em curso e culmina em uma reflexão crítica sobre caminhos possíveis para reduzir impactos e promover alternativas mais alinhadas à sustentabilidade. A metodologia adotada baseia-se em revisão bibliográfica e análise documental de autores clássicos e contemporâneos, como Freeman, Sachs e Yergin, além de estudos recentes sobre tecnologias de mitigação de impactos ambientais.

O Capítulo I apresenta um panorama histórico e econômico da indústria do petróleo, abordando sua trajetória desde o surgimento dos primeiros poços comerciais até sua consolidação como base energética do capitalismo industrial. São discutidas a formação de grandes corporações transnacionais, a estrutura produtiva marcada pela integração vertical e pela concentração de mercado, bem como os impactos das crises do petróleo e das políticas de segurança energética. O capítulo também relaciona o papel da inovação de processo à competitividade do setor, destacando a importância das transformações tecnológicas e das mudanças nas matrizes energéticas mundiais, especialmente no contexto da busca por fontes mais limpas e sustentáveis.

O Capítulo II aprofunda a análise sobre a estrutura econômica da atividade petrolífera, examinando a evolução e a geografia da oferta e da demanda global, o papel das empresas estatais e das grandes corporações privadas, além da dinâmica dos custos de exploração, refino e distribuição. Nesse capítulo, são apresentadas comparações entre o Brasil e o cenário internacional, enfatizando as especificidades da balança energética nacional e as políticas de incentivo à produção e à diversificação da matriz energética. A análise contempla ainda as implicações econômicas da volatilidade dos preços e as tensões geopolíticas que influenciam o mercado mundial de petróleo.

O Capítulo III discute as tecnologias e estratégias de mitigação ambiental adotadas pelo setor, abordando a relação entre inovação tecnológica e sustentabilidade. São exploradas as tecnologias de captura e armazenamento de carbono (CCS), os catalisadores de alta performance voltados à eficiência energética e as técnicas de recuperação avançada de petróleo (EOR), que visam otimizar a extração em campos maduros. Além disso, o capítulo analisa o papel das políticas públicas, dos incentivos econômicos e da regulação ambiental como instrumentos de promoção da sustentabilidade, evidenciando que a transição energética depende não apenas de avanços tecnológicos, mas também de governança, cooperação internacional e planejamento de longo prazo.

Por fim, espera-se que esta pesquisa contribua para o debate sobre o futuro da indústria do petróleo, demonstrando que a integração entre inovação tecnológica, responsabilidade ambiental e políticas públicas eficazes pode favorecer uma transição

energética gradual, economicamente viável e socialmente equilibrada, conciliando, ainda que de forma parcial, o desenvolvimento industrial com os objetivos de sustentabilidade e mitigação das mudanças climáticas.

CAPÍTULO I – A Indústria Do Petróleo, Inovação E Economia Sustentável

A relação entre energia e economia constitui um dos pilares da organização social e produtiva das sociedades modernas. Desde a Revolução Industrial, a disponibilidade e a forma de utilização das fontes energéticas moldaram não apenas o crescimento econômico, mas também a configuração das relações geopolíticas e o padrão de desenvolvimento tecnológico. Nesse contexto, o petróleo se consolidou, ao longo do século XX, como o recurso energético central, articulando cadeias produtivas complexas, sustentando a expansão industrial e tornando-se um elemento estratégico de poder e de competitividade entre nações.

A indústria do petróleo apresenta características que a diferenciam de outros setores da economia. Sua trajetória histórica é marcada por episódios de expansão, choques de oferta, disputas geopolíticas e formação de grandes corporações transnacionais que consolidaram modelos de integração vertical e concentração de mercado. Esses elementos explicam por que o petróleo não é apenas uma *commodity*, mas, como observa Yergin (1992), um instrumento de poder e sobrevivência econômica dos Estados modernos.

Outro aspecto fundamental é o papel da inovação tecnológica dentro do setor. Diferentemente de indústrias voltadas ao consumo final, nas quais predomina a inovação de produto, no petróleo as inovações de maior impacto têm ocorrido principalmente nos processos produtivos. O craqueamento catalítico¹, a automação de refinarias, os sensores de monitoramento ambiental e, mais recentemente, tecnologias de captura e armazenamento de carbono (CCS) exemplificam essa tendência. Como destaca Freeman (1984), trata-se de um setor em que predominam inovações incrementais, que, embora pouco perceptíveis ao consumidor, exercem papel decisivo para a eficiência, a redução de custos e a segurança operacional.

O debate contemporâneo sobre a indústria petrolífera, entretanto, não pode ser compreendido sem considerar as transformações em curso na balança e na matriz

¹ O craqueamento catalítico é um processo de refino que quebra moléculas pesadas do petróleo em moléculas menores, transformando frações densas em combustíveis leves com o uso de um catalisador químico que torna o processo mais eficiente e econômico.

energética. No plano mundial, a dependência estrutural de fontes fósseis permanece elevada, com petróleo, carvão e gás natural respondendo por mais de 80% da oferta energética, conforme analisa Smil (2017), ao destacar que as transições energéticas globais são lentas e historicamente determinadas por fatores econômicos, tecnológicos e institucionais. Já no Brasil, observa-se um contraste significativo: o país apresenta uma das matrizes mais limpas entre as grandes economias, com elevada participação de renováveis, em especial hidreletricidade e bioenergia, ainda que mantenha o petróleo como base da oferta interna e da pauta exportadora. Esse duplo caráter, de liderança em renováveis e de dependência dos hidrocarbonetos, revela a complexidade do cenário energético nacional, conforme destaca Goldemberg e Lucon (2008), ao apontar que a matriz brasileira combina avanços notáveis em sustentabilidade com desafios persistentes de dependência fiscal e tecnológica dos combustíveis fósseis.

A necessidade de mudança na matriz energética encontra respaldo nas diretrizes da Agenda 2030 da ONU e nos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), particularmente o ODS 7, que propõe assegurar energia limpa, acessível e moderna para todos. A transição energética, portanto, deve ser entendida como um processo sistêmico, que envolve inovação tecnológica, políticas públicas consistentes, governança internacional e participação social. Como ressalta Sachs (2015), o desenvolvimento sustentável deve articular crescimento econômico, justiça social, proteção ambiental e eficiência institucional.

Dessa forma, este capítulo busca compreender a trajetória e os dilemas contemporâneos da indústria do petróleo, analisando sua relevância econômica e histórica, o papel da inovação tecnológica, as mudanças na balança energética e a urgência de reestruturação da matriz global diante da crise climática. O objetivo é evidenciar como um setor que sustentou a civilização industrial moderna enfrenta, no século XXI, o desafio de compatibilizar sua lógica de funcionamento com os princípios da economia sustentável.

1.1A Indústria do Petróleo e a Economia Industrial

A indústria do petróleo é uma das expressões mais marcantes do capitalismo industrial moderno. Sua evolução histórica acompanha os principais marcos da industrialização global, sendo moldada por guerras, transformações tecnológicas e disputas geopolíticas. Desde a perfuração do primeiro poço comercial nos Estados Unidos, em 1859, a atividade petrolífera passou de curiosidade científica à principal base energética das sociedades industriais contemporâneas. A descoberta e a exploração sistemática desse recurso transformaram a matriz energética mundial e alteraram profundamente a estrutura das economias capitalistas, como descreve Yergin (1991), ao analisar a ascensão do petróleo como motor econômico e geopolítico da era moderna.

Nas primeiras décadas de sua expansão, o petróleo teve como principal destino a produção de querosene para iluminação, substituindo progressivamente o óleo de baleia que predominava no século XIX. Contudo, com o avanço das tecnologias de combustão interna e a popularização do automóvel no início do século XX, impulsionada pela introdução da linha de montagem de Henry Ford em 1913, a gasolina consolidou-se como o principal derivado e passou a representar o motor do crescimento industrial e urbano. Esse novo padrão de consumo transformou o petróleo em um insumo estratégico, tanto econômica quanto politicamente, dando origem a uma indústria altamente capitalizada, tecnicamente sofisticada e de relevância geopolítica global. Como observa Yergin (1991), a consolidação da indústria petrolífera nesse período não apenas redefiniu a matriz energética mundial, mas também remodelou as relações de poder entre Estados e corporações, inaugurando uma era em que o controle sobre o petróleo passou a significar influência econômica e militar.

Empresas como a *Standard Oil*, liderada por John D. Rockefeller, introduziram modelos empresariais que viriam a definir a estrutura da indústria nas décadas seguintes, como a integração vertical, o controle de preços e a formação de monopólios. Essas práticas permitiram o domínio de toda a cadeia produtiva, da extração ao refino e à distribuição, e responderam à necessidade de reduzir os riscos inerentes aos mercados de commodities e à volatilidade dos preços. Com isso, o setor passou a ser caracterizado por altos níveis de concentração e pela predominância de grandes corporações

transnacionais, que influenciam não apenas a dinâmica de mercado, mas também decisões políticas de âmbito nacional e internacional.

A consolidação dessa estrutura teve reflexos duradouros: após a dissolução da *Standard Oil* em 1911, várias de suas subsidiárias transformaram-se em multinacionais influentes, moldando a configuração global da indústria. Além disso, o petróleo passou a ocupar papel central nas estratégias militares das potências industrializadas. Durante a Primeira Guerra Mundial, pela primeira vez, o combustível líquido mostrou-se indispensável para o funcionamento de tanques, navios e aeronaves. Essa dependência se intensificou na Segunda Guerra Mundial, quando o controle sobre os campos petrolíferos do Cáucaso, do Norte da África e do Sudeste Asiático tornou-se fator estratégico determinante para o resultado dos confrontos. Como destaca Yergin (1991), o petróleo emergiu, nesse contexto, não apenas como fonte de energia, mas como elemento central da geopolítica moderna, sendo decisivo para o poderio militar, a reconstrução econômica do pós-guerra e a consolidação da influência global das grandes companhias petrolíferas.

Ao longo do século XX, o petróleo substituiu o carvão como fonte primária de energia, consolidando-se como insumo vital para os transportes, a indústria pesada e, posteriormente, a geração de eletricidade. Seu papel estratégico ficou ainda mais evidente durante as grandes guerras mundiais, quando o controle das reservas passou a ser visto como fator decisivo de poder. Após 1945, no período conhecido como “Trinta Gloriosos”, o petróleo foi central para sustentar o crescimento econômico dos países industrializados. Nesse contexto, as chamadas “sete irmãs”, consórcio das maiores empresas petrolíferas da época, passaram a dominar o comércio internacional do recurso, reforçando a capacidade do petróleo de lucratividade na economia global.

As “sete irmãs” (*Exxon, Mobil, Chevron, Texaco, Gulf, BP e Shell*) atuaram em estreita aliança com os governos ocidentais, controlando grande parte da produção mundial de petróleo durante boa parte do século XX. Essa cooperação garantia preços baixos, estabilidade no fornecimento e acesso privilegiado às reservas dos países produtores, especialmente no Oriente Médio. No entanto, como analisa Yergin (1991), essa hegemonia começou a ser desafiada nas décadas seguintes, com o fortalecimento de

empresas estatais em nações da África, América Latina e Ásia e, sobretudo, com a fundação da Organização dos Países Exportadores de Petróleo (OPEP) em 1960. Esse novo arranjo alterou profundamente a dinâmica do poder energético global, evidenciando a crescente tensão entre as potências consumidoras e os Estados detentores das reservas de petróleo.

A partir da década de 1970, com o fortalecimento da OPEP e as crises do petróleo de 1973 e 1979, a indústria passou a operar em um cenário de instabilidade geopolítica sem precedentes. Esses eventos expuseram a dependência das economias centrais em relação ao fornecimento de petróleo e estimularam a formulação de políticas de segurança energética baseadas na diversificação de fontes, na criação de reservas estratégicas e no incentivo à eficiência no consumo. Como analisa Sachs (2015), as crises energéticas dos anos 1970 foram um marco no reconhecimento dos limites de um modelo econômico excessivamente dependente de combustíveis fósseis e evidenciaram a necessidade de uma transição gradual para uma matriz mais sustentável e resiliente. Nesse contexto, houve um avanço significativo nos investimentos em tecnologias de prospecção, refino e eficiência energética, resultando em uma maior complexidade técnica e estratégica da cadeia produtiva do petróleo.

Como mostra a Figura 1, além das crises de abastecimento, o mercado passou a se tornar mais volátil, influenciado por guerras regionais, como o conflito Irã-Iraque (1980–1988), pela Guerra do Golfo (1990–1991) e, mais recentemente, por sanções econômicas e disputas comerciais. A partir dos anos 2000, a indústria do petróleo assistiu a novas mudanças estruturais com a entrada em cena da exploração nos Estados Unidos e da descoberta de reservas em águas ultraprofundas, como o pré-sal brasileiro. Essas inovações exigiram investimentos bilionários em tecnologias de ponta, incluindo craqueamento catalítico, sísmica tridimensional e sistemas robóticos de extração.

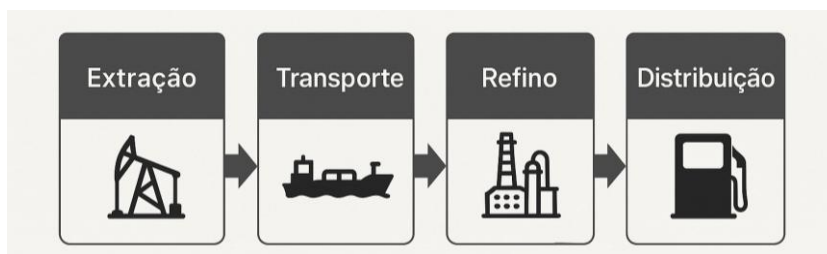
Figura 1 - Linha do Tempo da História do Petróleo.



Fonte: Elaboração própria a partir de Yergin (1992); OPEC (2023); IEA (*World Energy Outlook 2023*); Energy Institute (*Statistical Review of World Energy 2024*); ANP (2007); Petrobras (2008); UNFCCC (2021).

Sob a ótica da economia industrial, a indústria do petróleo apresenta características de elevada concentração e barreiras significativas à entrada. Os altos custos de investimento, o domínio de tecnologias complexas e as exigências regulatórias limitam o surgimento de novos concorrentes. Como ilustra a Figura 2, a prática recorrente da integração vertical, em que as empresas controlam todas as etapas produtivas, desde a extração até a distribuição, fortalece o poder de mercado das corporações já estabelecidas e dificulta a competição. Isso resulta em uma configuração oligopolista que, embora ofereça estabilidade ao setor, também gera resistência a inovações mais disruptivas, especialmente aquelas voltadas à transição energética e à sustentabilidade.

Figura 2 - Fluxograma de Integração Vertical na Indústria do Petróleo



Fonte: Elaboração própria a partir de Pinto Jr. et al. (2007) e Yergin (1992).

Empresas como Petrobras e *Shell* exemplificam essa lógica. Atuam de forma integrada e globalizada, influenciando mercados e políticas energéticas com base em sua capacidade técnico-financeira. Apesar de apresentarem discursos voltados à sustentabilidade e investirem em tecnologias limpas, sua estrutura de negócios ainda é fortemente baseada na exploração de combustíveis fósseis. Isso faz com que mudanças em direção à sustentabilidade ocorram de forma lenta e, geralmente, reativas a pressões externas, como marcos regulatórios, tratados internacionais e demandas da sociedade civil.

Essa dinâmica revela uma contradição estrutural que marca o setor: ao mesmo tempo em que detém enorme capacidade tecnológica e financeira, que poderia ser direcionada à inovação e à transição energética, encontra-se fortemente ancorada em um modelo de negócio que se sustenta na exploração de um recurso finito e ambientalmente problemático. A dependência econômica de muitos países em relação à renda gerada pelo petróleo também contribui para a manutenção desse modelo, criando um ciclo de dependência institucional e financeira que dificulta mudanças profundas.

Como afirma Yergin (1992, pg. 17), “o petróleo não é apenas uma *commodity*, é um elemento de poder, de estratégia e de sobrevivência econômica dos Estados modernos”. Essa afirmação sintetiza um dos principais argumentos desenvolvidos em sua obra “O Petróleo: uma história de ganância, poder e dinheiro”, na qual o autor demonstra como a trajetória da indústria petrolífera está indissociavelmente ligada às estruturas de dominação econômica, decisões geopolíticas e disputas por hegemonia global. Ao longo do século XX, o petróleo consolidou-se como o recurso-chave que move não apenas máquinas, mas também alianças internacionais, políticas de guerra, estratégias de segurança nacional e dinâmicas de poder corporativo.

Esse contexto contribui para explicar por que a indústria do petróleo, mesmo diante da crescente urgência das mudanças climáticas e da transição energética, ainda se mostra resistente a alterações estruturais profundas. As empresas e os Estados que dependem da renda petrolífera não estão apenas gerenciando um recurso natural, mas sim preservando um pilar estratégico de seu próprio sistema de poder. A leitura de Yergin reforça, portanto, a importância de compreender o setor não apenas por sua dimensão

produtiva ou tecnológica, mas também como um campo de forças políticas e institucionais que influenciam diretamente os caminhos, e os limites, da sustentabilidade no setor energético.

Portanto, compreender o funcionamento da indústria do petróleo exige a análise de seus aspectos históricos, estruturais e estratégicos. Trata-se de um setor que, graças à sua robustez econômica e à estabilidade institucional, demonstra elevada capacidade de adaptação, mas também em resistência às mudanças exigidas pelo novo paradigma da transição energética. Essa contradição estrutural será um dos focos centrais dos capítulos seguintes desta monografia, à medida que se busca compreender de que forma, e sob quais condições, a indústria petrolífera poderá se compatibilizar com os princípios de uma economia sustentável.

1.2 Inovações de Processo na Indústria do Petróleo

A trajetória tecnológica da indústria do petróleo está marcada principalmente pela inovação de processo, característica que a diferencia de setores como o eletrônico ou o de bens de consumo, nos quais predomina a inovação de produto. Essa distinção é essencial para compreender a dinâmica de modernização do setor petrolífero. De acordo com os conceitos desenvolvidos por Freeman (1984) sobre economia da inovação, a inovação de processo está relacionada a mudanças em técnicas, equipamentos, sistemas e métodos produtivos que buscam ampliar a eficiência operacional, reduzir custos, otimizar recursos e elevar a qualidade e a segurança nas operações. Como demonstra a Figura 3, a inovação de processo está associada a mudanças em técnicas, equipamentos, sistemas e métodos produtivos com o objetivo de ampliar a eficiência operacional, reduzir custos, otimizar recursos e elevar a qualidade e segurança nas operações, enquanto a inovação de produto envolve a introdução de novos combustíveis e tecnologias aplicadas à exploração. Aplicada à indústria do petróleo, essa perspectiva explica por que o setor concentra seus esforços em aprimorar continuamente seus processos produtivos, desde a extração até o refino, enquanto a inovação de produto, voltada à criação de novos combustíveis ou tecnologias de exploração, ocorre de forma mais limitada e pontual.

Figura 3 - Quadro Comparativo Entre Inovação de Produto e Inovação de Processo.

Inovação de produto	Inovação de processo
<ul style="list-style-type: none">• Introdução de combustíveis alternativos• Implantação de nova tecnologia de perfuração	<ul style="list-style-type: none">• Aperfeiçoamento no transporte de petróleo• Modernização de refinarias

Fonte: Elaboração própria a partir de Freeman (1984) e Pinto Jr. et al. (2007).

Enquanto setores voltados ao consumo final buscam constantemente lançar novos produtos no mercado, o setor petrolífero está voltado à otimização dos processos produtivos, desde a extração até o refino e a distribuição. Essa lógica se impõe porque a indústria opera com altíssimo volume de capital fixo, em atividades complexas e de grande escala, onde pequenas melhorias nos métodos podem gerar impactos relevantes na rentabilidade. A volatilidade do mercado internacional, os riscos geopolíticos e as pressões ambientais exigem, portanto, eficiência técnica contínua.

Ao longo do tempo, essa estratégia se concretizou por meio de diversas inovações. O craqueamento catalítico, por exemplo, revolucionou o refino ao permitir a transformação de frações mais pesadas do petróleo em combustíveis mais leves e valiosos. Na sequência, a automação das refinarias, os sistemas de controle digital em tempo real e o uso de modelagens avançadas para mapeamento de reservatórios aprofundaram a transformação técnica do setor. Essas ferramentas ampliaram a produtividade e reduziram significativamente o desperdício e os custos operacionais.

A inovação de processo também está diretamente associada à segurança operacional, um fator crítico na indústria do petróleo. Tecnologias como sensores de vazamento, monitoramento remoto e protocolos automatizados de emergência reduzem riscos ambientais e de acidentes, além de aumentarem a confiabilidade das operações. Em um setor rigidamente regulado e sob constante monitoramento público, essas inovações cumprem papel estratégico na sustentabilidade e legitimidade das operações.

Nos últimos anos, as exigências ambientais impulsionaram ainda mais o desenvolvimento de inovações de processo. Tecnologias como a captura e armazenamento de carbono (CCS), o reaproveitamento de resíduos industriais, o uso de catalisadores menos poluentes e a substituição de insumos energéticos convencionais por fontes mais limpas vêm se consolidando. Tais avanços refletem uma mudança de paradigma: a inovação já não é motivada apenas por ganhos de produtividade, mas também por uma necessidade crescente de adaptação regulatória e responsabilidade socioambiental.

Um dos aspectos mais característicos da inovação de processo na indústria do petróleo é seu caráter incremental. Como destaca Freeman (1984, pg. 25), “a maior parte das inovações nas indústrias químicas e petrolíferas ocorre por meio de mudanças graduais, contínuas e cumulativas, e não por transformações abruptas”. Ou seja, as melhorias tecnológicas não surgem de rupturas radicais, mas de pequenos avanços sucessivos, que se acumulam ao longo do tempo. Esses progressos são fruto da combinação entre o conhecimento técnico consolidado, a experiência adquirida em campo e os investimentos regulares em pesquisa e desenvolvimento (P&D). Apesar de frequentemente passarem despercebidas pelo público externo, essas inovações desempenham um papel central na manutenção da competitividade e da sustentabilidade econômica do setor, especialmente em um ambiente marcado por volatilidade de preços e exigências crescentes por eficiência e responsabilidade ambiental.

As grandes corporações petrolíferas destinam parte relevante de seus recursos a parcerias com centros de pesquisa e universidades, incentivando o desenvolvimento de tecnologias avançadas, como robótica submarina, inteligência artificial aplicada à perfuração e sensores sísmicos de alta precisão. De acordo com relatórios da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP, 2023) e da Petrobras (2024), os investimentos em pesquisa, desenvolvimento e inovação (P,D&I) no setor têm se concentrado especialmente em soluções voltadas à exploração em ambientes extremos, como águas ultra profundas, reforçando a liderança tecnológica do país nesse segmento. A Agência Internacional de Energia (IEA, 2020) também destaca que tais inovações ampliam a capacidade de exploração, aumentam a segurança operacional e melhoram

significativamente o controle e a eficiência das operações offshore, consolidando o papel da tecnologia como eixo estratégico de sustentabilidade e competitividade na indústria do petróleo.

Diferente da inovação de produto, facilmente percebida pelo consumidor, a inovação de processo ocorre majoritariamente nos bastidores industriais. Ainda assim, seu impacto é profundo: melhorias na eficiência energética, na conversão de insumos e na redução de emissões contribuem para operações mais limpas e econômicas. Por exemplo, mudanças na composição de catalisadores permitem que refinarias produzam mais combustível com menos rejeitos, refletindo diretamente na performance ambiental e financeira da empresa.

Mesmo que o produto final continue sendo essencialmente o mesmo, os métodos empregados para produzi-lo têm passado por transformações contínuas. A inovação de processo tornou-se, portanto, não apenas uma ferramenta de otimização econômica, mas também uma forma de enfrentar os desafios impostos pela transição energética, pela regulação ambiental e pelas demandas sociais por maior responsabilidade corporativa.

1.3 A Importância do Petróleo na Balança Energética

O balanço energético consiste em uma representação quantitativa e estruturada dos fluxos de energia em uma economia, evidenciando a origem, a transformação, a distribuição e o consumo final das diferentes fontes energéticas. Seu objetivo é permitir o acompanhamento da evolução da matriz energética, a identificação de dependências externas, a avaliação da eficiência no uso dos recursos e o suporte à formulação de políticas públicas e estratégias empresariais voltadas à segurança energética e à sustentabilidade.

A análise comparativa entre a balança energética mundial e a brasileira evidencia diferenças estruturais significativas, que ajudam a compreender o papel singular do país na transição energética global. Como mostra a Tabela 1, enquanto a matriz internacional continua marcada pela predominância de combustíveis fósseis (petróleo, carvão e gás natural somando mais de 80% da oferta global), o Brasil se destaca por apresentar uma

das combinações mais limpas e diversificadas entre as grandes economias, com forte participação de bioenergia e hidrelétrica.

Tabela 1 - Comparativo da matriz energética mundial e brasileira.

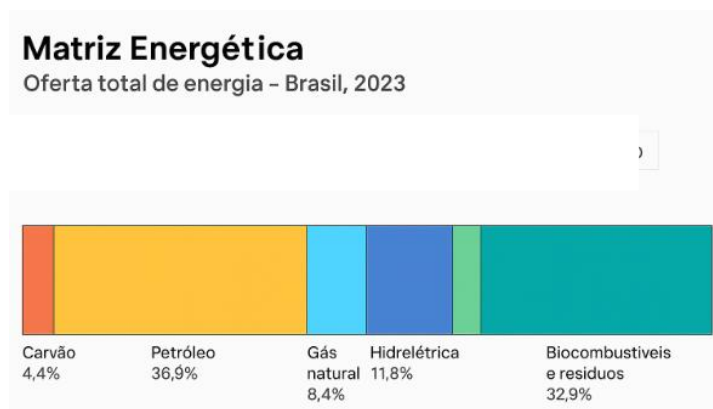
Fonte	Mundo (%)	Brasil (%)
Petróleo	31	36.9
Carvão	27	4.4
Gás Natural	23	8.4
Hidrelétrica	7	11.8
Bioenergia/Resíduos	6	32.9
Outras Renováveis	9	5.0
Nuclear	5	0.0

Fonte: Elaboração própria adaptado de dados da Agência Internacional de Energia (IEA, 2022; 2023).

No plano mundial, a matriz energética permanece fortemente concentrada em fontes não renováveis. Dados da Agência Internacional de Energia (IEA) apontam que, em 2022, aproximadamente 31% da oferta primária global veio do petróleo, seguido por 27% do carvão mineral e 23% do gás natural. Somadas, essas três fontes responderam por mais de 80% do consumo energético total, consolidando o caráter fóssil da matriz internacional. Em contrapartida, as renováveis modernas (solar, eólica, biomassa avançada e geotérmica) representaram apenas cerca de 15% da oferta, enquanto a energia nuclear manteve participação estável em torno de 5%. Essa configuração torna o setor energético o maior responsável pelas emissões de gases de efeito estufa (GEE) e o principal obstáculo ao cumprimento das metas de descarbonização estabelecidas no Acordo de Paris e reafirmadas em conferências climáticas como a COP26 e a COP28.

O caso brasileiro apresenta um perfil contrastante em relação à média global. As políticas energéticas adotadas ao longo das últimas décadas garantiram a universalização quase completa do acesso à eletricidade e permitiram que cerca de 45% da oferta interna de energia primária seja proveniente de fontes renováveis, mais que o triplo da média mundial. Como ilustra o Gráfico 1, a matriz brasileira em 2023 foi composta por petróleo (36,9%), bioenergia e resíduos (32,9%), hidroeletricidade (11,8%), gás natural (8,4%) e carvão mineral (4,4%). Esse perfil coloca o país entre os menos intensivos em carbono do mundo, destacando-se em relação a outras grandes economias emergentes, como China e Índia, que ainda apresentam alta dependência do carvão para geração elétrica.

Gráfico 1 - Matriz energética brasileira em 2023.



Fonte: Agência Internacional de Energia (IEA, 2023).

Na dimensão elétrica, a diferença é ainda mais marcante. Enquanto, em escala global, o carvão mineral ainda responde por cerca de 35% da geração de eletricidade, no Brasil quase 80% da eletricidade é produzida a partir de hidrelétricas. Esse cenário tem garantido ao país uma das matrizes elétricas mais limpas do mundo, embora o setor de transportes e parte da indústria ainda dependam fortemente de derivados de petróleo. O crescimento das fontes solar fotovoltaica e eólica também tem contribuído para ampliar a diversificação do sistema, com projeções de que representem quase 70% das novas adições de capacidade instalada nos próximos anos. Conforme destaca Sachs (2015), a transição para uma matriz elétrica de baixo carbono é um dos pilares do desenvolvimento sustentável, pois alia segurança energética, inovação tecnológica e redução de emissões, elementos fundamentais para a consolidação de uma economia mais equilibrada e ambientalmente responsável.

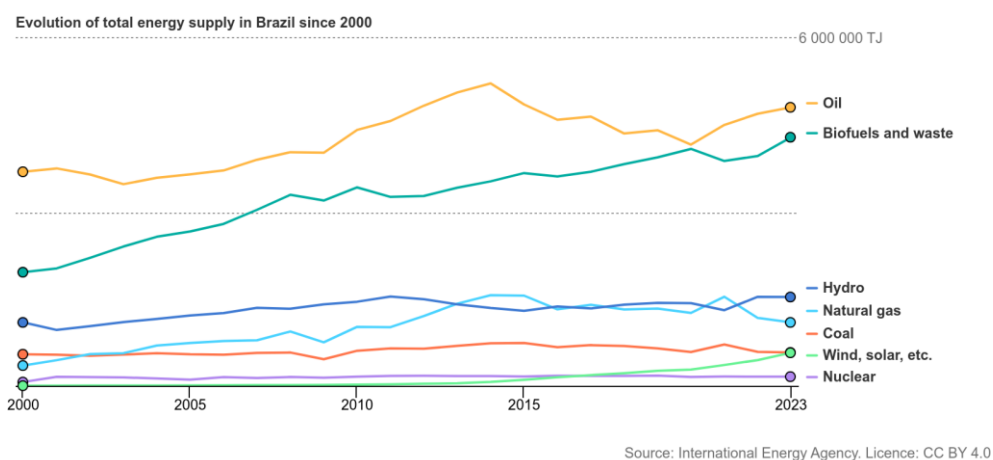
Além disso, a bioenergia ocupa papel estratégico no Brasil. O país é líder mundial em biocombustíveis de segunda geração, e os veículos *flex-fuel* sustentam um amplo mercado interno de etanol, cujo fornecimento deve superar 660 mil barris por dia em 2026. No contexto internacional, poucas economias apresentam experiência equivalente na integração de biocombustíveis à matriz de transportes. Conforme destaca Goldemberg (2008), a trajetória brasileira na produção e uso do etanol demonstra que políticas públicas consistentes, aliadas à inovação tecnológica e à expansão da escala industrial, permitiram ao país alcançar uma posição de liderança mundial em energia

limpa. Para o autor, o exemplo brasileiro evidencia que é possível promover uma transição energética sustentável sem comprometer o crescimento econômico, conciliando eficiência produtiva, redução de emissões e segurança energética.

Em paralelo, a exploração do pré-sal consolidou o Brasil como uma das principais províncias petrolíferas globais. Desde 2017, o país é exportador líquido de petróleo, com produção projetada para atingir 4,2 milhões de barris por dia até 2026. Essa condição amplia a relevância geopolítica do Brasil, ao mesmo tempo em que evidencia a dualidade de sua balança energética: de um lado, o protagonismo em energias renováveis; de outro, a manutenção da dependência econômica e fiscal vinculada à exportação de hidrocarbonetos. Conforme analisa Oliveira (2019), a ascensão do pré-sal introduz uma contradição estrutural na política energética brasileira, pois reforça o papel do petróleo como fonte de receita e de poder estratégico, mesmo em um contexto de transição global para fontes de baixo carbono.

No âmbito dos compromissos internacionais, o Brasil anunciou na COP26 a meta de atingir a neutralidade de carbono até 2050, reduzir em 50% as emissões até 2030 e zerar o desmatamento ilegal no mesmo horizonte. Essas metas são apoiadas por políticas como o Plano de Ação Climática 2030 e a Estratégia Nacional do Hidrogênio, que busca posicionar o país também na fronteira tecnológica da transição energética. Como mostra o Gráfico 2, a evolução da oferta de energia no Brasil entre 2000 e 2023 evidencia o crescimento expressivo da bioenergia e dos resíduos, acompanhando a relevância do petróleo, ao mesmo tempo em que outras fontes, como gás natural e hidrelétrica, tiveram expansão moderada, e renováveis modernas, como solar e eólica, iniciaram sua trajetória ascendente mais recentemente.

Gráfico 2 - Evolução da oferta total de energia no Brasil (2000–2023).



Fonte: Agência Internacional de Energia (IEA, 2023).

Dessa forma, o contraste entre a balança energética mundial e a brasileira é evidente: enquanto a matriz global permanece rigidamente ancorada em combustíveis fósseis, o Brasil combina elevada participação de renováveis com uma política energética que, embora ainda dependa da exploração de petróleo, oferece caminhos mais consistentes para uma transição em direção à sustentabilidade.

1.4 Matriz Energética e Suas Mudanças

A compreensão da diferença entre matriz energética e balanço energético é fundamental para a análise do sistema energético de um país. A matriz energética representa a estrutura percentual das fontes de energia que compõem a oferta total de um território, evidenciando a participação relativa de petróleo, gás natural, carvão mineral, hidrelétrica, biomassa, energia solar e eólica, entre outras. Já o balanço energético é o instrumento técnico que organiza e quantifica os fluxos de energia, desde a produção, importação e exportação até o consumo final. Enquanto a matriz fornece uma visão geral da composição e do perfil da oferta de energia, o balanço apresenta uma leitura detalhada do percurso da energia dentro do sistema econômico, permitindo identificar gargalos, dependências e oportunidades de diversificação. Conforme explica Goldemberg (2008), o balanço energético é o instrumento que permite compreender o fluxo completo de energia dentro de uma economia, enquanto a matriz energética reflete

a estrutura das fontes que compõem essa oferta. Assim, o balanço fornece os dados que dão origem à matriz, e esta, por sua vez, expressa a diversidade e o grau de dependência das fontes energéticas de um país. Dessa forma, ambos os conceitos se complementam e são essenciais para avaliar o nível de sustentabilidade e eficiência de um sistema energético, bem como para subsidiar políticas públicas voltadas à transição energética e à segurança do abastecimento.

A matriz energética está no centro dos debates globais sobre sustentabilidade, pois sua configuração reflete tanto o modelo de desenvolvimento econômico vigente quanto os limites ambientais impostos pelas mudanças climáticas. Como mostra a Figura 4, a Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU), ao estabelecer os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), coloca a energia como tema central em dois de seus pilares: o ODS 7, que busca assegurar o acesso a energia limpa, acessível e moderna para todos, e o ODS 13, que propõe medidas urgentes de combate às mudanças climáticas. Esses objetivos reforçam que a transformação da matriz energética não é apenas um desafio tecnológico, mas também social, econômico e institucional.

Figura 4 - As 17 Metas Globais.



Fonte: Organização das Nações Unidas (ONU). Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) – Agenda 2030. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>

Nesse sentido, a transição energética pressupõe dois movimentos complementares. O primeiro é a redução da dependência estrutural de combustíveis fósseis, substituindo-os por fontes renováveis e mais limpas, como solar, eólica, biomassa avançada e hidrogênio verde. O segundo é a melhoria da eficiência energética, de modo a tornar a economia menos intensiva em consumo de energia e reduzir emissões associadas. Trata-se, portanto, de um processo que envolve inovação tecnológica, redesenho produtivo e novas formas de governança.

Conforme destaca Smil (2010), transições energéticas não se dão de forma abrupta, mas são transformações estruturais de longo prazo, que exigem reconfiguração de sistemas econômicos, padrões de consumo e infraestrutura produtiva. A mudança, portanto, depende tanto da tecnologia quanto de planejamento coordenado e capacidade institucional.

Entretanto, observa-se que países com alto grau de desenvolvimento em técnicas de extração e refino menos agressivas tendem a apresentar maior resistência em avançar para fontes totalmente renováveis. A lógica é clara: quanto mais eficiente e menos poluente se torna o processo de exploração de petróleo e gás, maior é o incentivo econômico e institucional para prolongar sua utilização. Essa dinâmica, embora traga ganhos ambientais imediatos ao reduzir os impactos da produção, pode retardar a transição energética de longo prazo, criando uma dependência tecnológica que posterga a adoção de alternativas mais sustentáveis.

Nesse ponto, políticas ambientais e pressão social exercem papel crucial como indutores da mudança. Leis mais rígidas de emissões, acordos internacionais de clima, metas nacionais de descarbonização e instrumentos de regulação do mercado de carbono criam um ambiente em que o investimento em fontes limpas se torna não apenas desejável, mas inevitável. Paralelamente, a mobilização social, expressa por consumidores, movimentos ambientais e pela opinião pública global, pressiona governos e empresas a adotar práticas mais sustentáveis, muitas vezes antecipando tendências que ainda não foram plenamente incorporadas às estruturas de mercado.

O caso brasileiro ilustra esse paradoxo: de um lado, a matriz elétrica é uma das mais limpas do mundo, com forte presença de hidrelétrica, bioenergia e crescente participação de solar e eólica; de outro, a exploração do pré-sal e a relevância fiscal do petróleo reforçam a dependência do país em relação aos combustíveis fósseis. Essa contradição reflete um dilema global: como conciliar a urgência climática com interesses econômicos de curto prazo, especialmente em países com vastas reservas e domínio tecnológico em exploração.

Assim, as mudanças na matriz energética mundial não podem ser vistas apenas como consequência do avanço tecnológico, mas como resultado da interação entre ciência, política e sociedade. Como argumenta Sovacool (2016), a tecnologia isoladamente tende a reforçar estruturas existentes, a menos que esteja inserida em contextos de mudança institucional e engajamento social. A Agenda 2030, nesse sentido, indica que o futuro da energia deve estar ancorado em um modelo menos poluente, mais eficiente e socialmente inclusivo. No entanto, como alerta Smil (2017), o uso contínuo de inovações nos combustíveis fósseis pode prolongar a dependência dessas fontes, dificultando a transição. Por isso, é essencial que tais avanços não sejam usados como justificativa para o adiamento da mudança, mas como ferramentas de mitigação dentro de um plano mais amplo de substituição estrutural.

CAPÍTULO II – A Indústria Petrolífera: Aspectos econômicos.

A indústria do petróleo constitui um dos setores mais complexos e estratégicos da economia mundial. Sua importância vai muito além da dimensão energética, alcançando aspectos geopolíticos, tecnológicos e financeiros que moldam as relações internacionais e influenciam o ritmo do crescimento econômico global. Ao longo do século XX e início do XXI, o petróleo consolidou-se como o principal insumo da economia, articulando cadeias produtivas que vão do transporte à petroquímica, além de representar parcela significativa das receitas fiscais e das balanças comerciais de diversos países produtores.

Compreender o funcionamento dessa indústria exige analisar três dimensões fundamentais: a demanda, que revela os setores e regiões que sustentam o consumo do recurso; a oferta, determinada não apenas por fatores geológicos, mas também por instituições, empresas e dinâmicas geopolíticas; e, por fim, os custos, que definem a competitividade e a viabilidade da exploração em diferentes contextos. Essas variáveis interagem constantemente, configurando um mercado marcado por volatilidade de preços, ciclos de expansão e retração, e um permanente tensionamento entre interesses econômicos e ambientais.

Como afirmam Pinto Jr. et al. (2007, pg. 79), a economia do petróleo deve ser vista como “um campo no qual se entrelaçam riscos técnicos, incertezas de mercado e disputas políticas”. É nesse entrelaçamento que se encontra o desafio contemporâneo: equilibrar a relevância estratégica do petróleo com as crescentes pressões por sustentabilidade e pela transição para uma matriz energética menos intensiva em carbono.

Neste capítulo, portanto, analisaremos a indústria petrolífera a partir de três eixos centrais. O primeiro aborda a demanda do petróleo, destacando sua evolução histórica, os setores consumidores e as perspectivas futuras. O segundo discute a oferta mundial, com ênfase no papel das grandes corporações, dos Estados produtores e da tecnologia. Por fim, o terceiro examina a estrutura de custos, evidenciando como os elevados investimentos e a formação de rendas específicas influenciam a dinâmica de mercado.

2.1 Demanda do Petróleo

A demanda por petróleo ocupa posição central na economia global. Diferentemente de outros insumos, sua elasticidade-preço é relativamente baixa: mesmo com elevações significativas nos preços, o consumo tende a permanecer elevado devido ao papel estratégico que o petróleo desempenha em setores-chave, como transportes, geração de energia em determinadas regiões e indústria petroquímica. Segundo Pinto Jr. et al. (2007), a trajetória da demanda pelo petróleo deve ser entendida não apenas como reflexo do crescimento econômico, mas como fator estruturante da competitividade internacional, pois os custos energéticos influenciam diretamente a capacidade produtiva das nações.

Historicamente, a demanda mundial por petróleo cresceu de forma acelerada no período pós-Segunda Guerra Mundial, consolidando o recurso como a principal fonte de energia global. A expansão do transporte rodoviário e aéreo, a urbanização e a industrialização em massa reforçaram sua centralidade nas economias modernas. Como analisa Yergin (1991), esse crescimento contínuo esteve diretamente relacionado à reconstrução econômica e à consolidação de um modelo industrial intensivo em energia. No entanto, as crises do petróleo de 1973 e 1979 expuseram a vulnerabilidade dos países dependentes das importações, levando as economias desenvolvidas, especialmente as da OCDE, a adotarem políticas voltadas à eficiência energética e à diversificação de fontes. Ainda assim, a demanda global manteve trajetória de expansão nas décadas seguintes, impulsionada pela ascensão das economias emergentes, que passaram a ocupar papel central no consumo energético mundial.

Nas últimas décadas, observa-se um claro deslocamento geográfico do consumo. Enquanto o uso do petróleo estabilizou-se ou caiu em países desenvolvidos, como membros da União Europeia e Japão, houve forte expansão em países como China, Índia e Brasil. A China, por exemplo, tornou-se o maior importador mundial de petróleo, sustentada pelo aumento de sua frota de veículos e pela demanda industrial. Esse fenômeno confirma o diagnóstico de Pinto Jr. et al. (2007, pg. 79), de que “o crescimento econômico das nações emergentes redefine o eixo da demanda global de energia”.

Os setores consumidores reforçam o caráter estratégico do petróleo. O transporte rodoviário responde pela maior parcela do consumo, dada a predominância de derivados como gasolina e diesel. O transporte aéreo e marítimo também permanece altamente dependentes, dada a inexistência de alternativas economicamente viáveis em larga escala. Além disso, a indústria petroquímica utiliza o petróleo como matéria-prima essencial para plásticos, fertilizantes, solventes e outros insumos que sustentam cadeias produtivas globais.

O futuro da demanda por petróleo, no entanto, encontra-se condicionado por dois vetores principais: o avanço da transição energética e as políticas de mitigação climática. De um lado, a eletrificação da frota de veículos, os investimentos em transporte público sustentável e o incentivo ao uso de energias renováveis tendem a reduzir gradualmente o peso do petróleo nas próximas décadas. De outro, setores de difícil substituição, como a aviação e a indústria petroquímica, indicam que o recurso continuará exercendo papel relevante até meados do século XXI. Como destaca Smil (2017), as transições energéticas são processos historicamente lentos e cumulativos, nos quais as fontes tradicionais não desaparecem de imediato, mas coexistem com as novas tecnologias por longos períodos. Nesse sentido, o desafio global consiste em equilibrar a manutenção de um insumo ainda essencial com a urgência de reduzir drasticamente as emissões de gases de efeito estufa, conciliando segurança energética, inovação tecnológica e sustentabilidade ambiental.

2.2 Oferta do Petróleo

Segundo Yergin (1992, pg. 507), um dos maiores estudiosos da geopolítica do petróleo, “o Oriente Médio sempre foi o coração da produção de petróleo mundial, tanto por suas vastas reservas quanto pelo custo extremamente baixo de extração”. Essa observação destaca como a configuração da oferta global de petróleo está profundamente enraizada em fatores geológicos e estratégicos. A concentração das reservas em poucas regiões do planeta, especialmente no Oriente Médio, confere poder de mercado e influência diplomática a países como Arábia Saudita, Irã, Iraque e Kuwait.

A oferta de petróleo, portanto, não é determinada apenas por condições naturais, mas também por dinâmicas econômicas, políticas e institucionais. Trata-se de uma indústria altamente concentrada, cujas decisões de produção, investimento e exportação repercutem diretamente nos preços internacionais, na estabilidade dos mercados e nas relações entre Estados. A compreensão desse cenário é essencial para analisar a estrutura do setor energético e seus impactos sobre a economia global.

Do ponto de vista institucional, a OPEP e, mais recentemente, a OPEP+ (que inclui Rússia e outros produtores) exercem papel determinante no equilíbrio entre oferta e preços. A estratégia do cartel de limitar ou ampliar a produção tem impacto direto sobre o mercado mundial, influenciando desde a inflação global até o crescimento econômico de países importadores. Pinto Jr. et al. (2007, pg. 97) destacam que “o poder de mercado da OPEP decorre não apenas da concentração das reservas, mas também da coordenação de políticas nacionais”.

A atuação das grandes corporações internacionais e das empresas estatais também é fundamental para compreender a oferta. As chamadas “*majors*” (*ExxonMobil, Chevron, BP, Shell*) e as companhias nacionais (Saudi Aramco, Petrobras, PDVSA, entre outras) dominam a exploração e produção em escala global. Essas empresas operam em contextos distintos, mas compartilham a característica de serem intensivas em capital e tecnologia, com grande capacidade de influenciar políticas públicas e decisões estratégicas em seus países.

O desenvolvimento tecnológico desempenhou papel crucial na expansão da oferta. A exploração em águas profundas e ultraprofundas, como no pré-sal brasileiro, representa uma fronteira tecnológica que elevou a produção em países fora da OPEP. Paralelamente, a revolução do *shale oil* nos Estados Unidos alterou significativamente o equilíbrio do mercado. Com a técnica de fraturamento hidráulico, os EUA tornaram-se o maior produtor mundial de petróleo, reduzindo sua dependência externa e aumentando a volatilidade dos preços internacionais.

No entanto, a oferta de petróleo é altamente vulnerável a fatores externos. Conflitos armados, sanções econômicas, instabilidade política em países produtores e

até desastres naturais podem afetar a produção global, provocando choques de preço. Esse caráter instável reforça o status do petróleo como recurso estratégico e explica as políticas de segurança energética adotadas por países importadores, como manutenção de estoques estratégicos e diversificação de fornecedores.

Diante da transição energética, a oferta mundial enfrenta um dilema. Por um lado, a exploração de novas fronteiras (Ártico, offshore africano) pode expandir reservas disponíveis. Por outro, pressões ambientais, compromissos internacionais de descarbonização e riscos reputacionais podem restringir o avanço desses projetos. O resultado é um cenário de incerteza, no qual a geopolítica, a economia e a sustentabilidade se entrelaçam de forma decisiva.

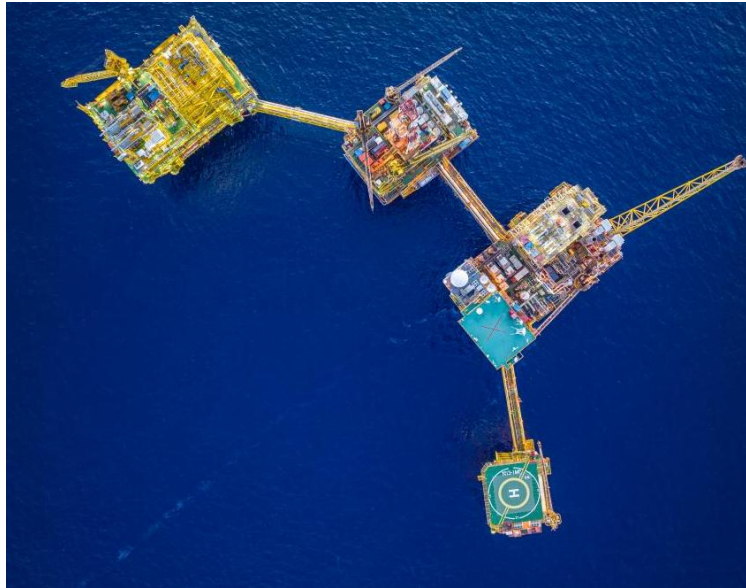
2.3 O Custo do Petróleo

Os custos de exploração, desenvolvimento e produção são variáveis-chave para a dinâmica da indústria petrolífera. Diferentemente de outros setores, a produção de petróleo é intensiva em capital, exige investimentos de longo prazo e apresenta grande heterogeneidade regional.

Na fase de exploração, os custos incluem estudos geológicos, levantamentos sísmicos e perfuração de poços exploratórios. É a etapa de maior risco, pois nem sempre resulta em descobertas comercialmente viáveis. Como destaca Pinto Jr. et al. (2007, pg. 103), “o risco geológico e a incerteza sobre preços futuros tornam a exploração a fase mais incerta da indústria do petróleo”.

A etapa de desenvolvimento concentra os maiores custos fixos, pois envolve a construção de toda a infraestrutura necessária para iniciar a produção. Como exemplifica a Figura 5, esse processo inclui a perfuração de poços adicionais, a instalação de plataformas *onshore* e *offshore*, oleodutos e unidades de processamento. Trata-se de uma fase que pode levar anos para ser concluída e requer investimentos bilionários, geralmente viabilizados por grandes companhias ou consórcios internacionais

Figura 5 - Plataforma Offshore (China National Offshore Oil Corporation).



Fonte: China National Offshore Oil Corporation (CNOOC, 2023).

Na fase de produção, os custos tornam-se recorrentes e incluem manutenção de equipamentos, mão de obra, consumo energético e logística de transporte. Em campos maduros, os custos tendem a crescer devido à necessidade de tecnologias adicionais, como a recuperação avançada (EOR). Nesse ponto, o custo marginal de produção pode se tornar decisivo para determinar a viabilidade de continuidade do campo.

A estrutura de custos também explica a existência de rendas diferenciais e de monopólio. Campos com petróleo de fácil acesso e baixo custo (como no Oriente Médio) proporcionam rendas diferenciais em relação a campos mais caros, como águas profundas ou *shale oil*. Já a concentração de mercado permite a apropriação de rendas de monopólio por parte das grandes companhias e países produtores, que utilizam seu poder de mercado para influenciar preços globais.

Regionalmente, os custos de produção de petróleo variam amplamente conforme as condições geológicas e tecnológicas de cada região. De acordo com a Agência Internacional de Energia (AIE, 2023) e o Instituto de Energia (2024), os países do Oriente Médio apresentam os menores custos de extração, variando entre US\$ 10 e 15 por barril, em razão da alta produtividade e da facilidade de acesso às reservas. Em contrapartida, projetos desenvolvidos em áreas mais complexas, como o pré-sal brasileiro e o Ártico,

podem ultrapassar US\$ 30 a 40 por barril, devido às condições técnicas e ambientais desafiadoras. Já o petróleo de xisto produzido nos Estados Unidos, embora possua custos médios mais elevados, destaca-se pela flexibilidade operacional, permitindo ajustes rápidos na produção conforme as variações dos preços internacionais. Esses dados demonstram como os fatores geográficos, tecnológicos e econômicos exercem influência direta sobre a competitividade e a dinâmica global da indústria do petróleo.

Por fim, a crescente regulação ambiental e as exigências por tecnologias menos poluentes têm elevado os custos da indústria. A implementação de sistemas de captura e armazenamento de carbono (CCS) e a adoção de catalisadores mais eficientes aumentam os investimentos de curto prazo, mas representam condições necessárias para manter a legitimidade social e a viabilidade de longo prazo da indústria em um mundo em transição energética.

CAPÍTULO III – ECONOMIA SUSTENTÁVEL: ESTRATÉGIAS DE REDUÇÃO DE DANOS NA INDÚSTRIA PETROLÍFERA

A relação entre meio ambiente e energia ganhou centralidade nas últimas décadas porque o modo como produzimos e consumimos energia condiciona, ao mesmo tempo, a competitividade das economias, a segurança do abastecimento e a estabilidade do clima. O debate deixou de ser estritamente tecnológico para se tornar estrutural: envolve a reconfiguração de sistemas produtivos, a coordenação de políticas públicas, a precificação de externalidades e uma disputa por trajetórias de desenvolvimento compatíveis com os limites ecológicos. A transição energética, assim, não se reduz à troca de fontes; implica redesenhar processos industriais, cadeias de suprimento, infraestrutura e modelos de negócio, aproximando agendas de inovação, regulação e justiça social.

No âmbito multilateral, a Agenda 2030 explicita essa convergência quando articula o ODS 7 (energia limpa e acessível) com o ODS 13 (ação climática), sinalizando que inclusão e prosperidade dependem de um sistema energético menos intensivo em carbono e mais eficiente. O setor de petróleo, peça-chave da modernização do século XX, enfrenta o desafio de operar sob novas expectativas: reduzir emissões em toda a cadeia de valor, gerir riscos climáticos físicos e de transição, e preservar a segurança energética num contexto de demanda em declínio relativo. Não se trata de negar a relevância econômica do petróleo nos curto e médio prazos, mas de compatibilizar sua presença residual com metas climáticas críveis e verificáveis.

Essa compatibilização é, por natureza, gradual e assimétrica. Países e empresas partem de bases tecnológicas diferentes, têm ritmos de investimento distintos e enfrentam realidades institucionais desiguais. Ainda assim, observa-se convergência em três frentes. A primeira é a mitigação “dentro do portão”, ou seja, a redução da intensidade ambiental das operações já existentes (controle rigoroso de metano, eliminação de queima em tocha, eletrificação de ativos, gestão hídrica e de resíduos, abandono e descomissionamento responsáveis). A segunda é a arquitetura de governança e incentivos, sistemas de precificação de carbono, padrões de divulgação de riscos e emissões, taxonomias de finanças sustentáveis, metas intermediárias auditáveis, que

realinham sinais econômicos. A terceira é a diversificação tecnológica, com a expansão de renováveis, armazenamento, biocombustíveis avançados, hidrogênio de baixo carbono e captura e armazenamento de carbono (CCUS), além de soluções baseadas na natureza.

Do ponto de vista econômico, o custo de atrasar a transição tende a ser mais elevado do que o de agir cedo. Isso decorre do encurtamento das janelas de investimento, da obsolescência de ativos, do aumento dos prêmios de risco e das barreiras de acesso a mercados que incorporam critérios climáticos. Em setores com ciclos longos e alta intensidade de capital, como o de petróleo e gás, o tempo é uma variável estratégica: remodelar portfólios, desenvolver competências e adaptar infraestrutura requer programas plurianuais, consistentes e cumulativos.

O caso brasileiro ilustra bem a tensão e as oportunidades da transição. De um lado, a matriz elétrica com alta participação de fontes renováveis, o ecossistema de bioenergia, a queda de custos de solar e eólica e o potencial eólico *offshore* oferecem vantagens comparativas claras. De outro, o pré-sal representa receitas fiscais, investimentos e saldo externo relevantes, e uma cadeia de fornecedores com competências raras em águas profundas. A questão prática não é “se” haverá transição, mas “como” gerir sua velocidade e seus instrumentos, de modo a maximizar ganhos de produtividade, reduzir a vulnerabilidade climática, estimular inovação e distribuir custos e benefícios de forma justa.

Com esse pano de fundo, este capítulo está organizado em dois movimentos complementares. O primeiro discute a mitigação dos impactos e as condições para uma “longevidade compatível” do uso do petróleo, tomando como autor-âncora Stern (2006), cuja argumentação econômica sobre os custos da inação climática fundamenta a urgência do ajuste. O segundo mapeia tecnologias e fontes sustentáveis com maior potencial de integração e substituição, mobilizando a leitura de Rifkin (2011) sobre a convergência entre energia limpa, digitalização e redes inteligentes. A intenção é oferecer, sem redundâncias, um quadro analítico e propositivo para orientar políticas e estratégias corporativas na travessia rumo a uma economia de baixo carbono.

3.1 Os impactos ambientais no setor do petróleo.

A expansão da indústria do petróleo ao longo do século XX e início do XXI está diretamente associada ao aumento das emissões de gases de efeito estufa e ao agravamento da crise climática. Do ponto de vista energético, a queima de combustíveis fósseis ainda responde pela maior parte das emissões globais de CO₂, e o petróleo ocupa posição central nesse quadro. Dados recentes da Agência Internacional de Energia (IEA) indicam que, em 2023–2024, as emissões globais de CO₂ relacionadas à energia atingiram cerca de 37,8 Gt, o maior valor já registrado, contribuindo para concentrações atmosféricas médias em torno de 422–423 ppm em 2024, aproximadamente 50% acima dos níveis pré-industriais.

Quando se observa a decomposição das emissões por tipo de combustível, a IEA estima que o carvão responda por cerca de 44% das emissões de gases de efeito estufa provenientes da combustão de energia, o petróleo por 32% e o gás natural por 22%, o que evidencia o peso específico do petróleo na matriz fóssil.

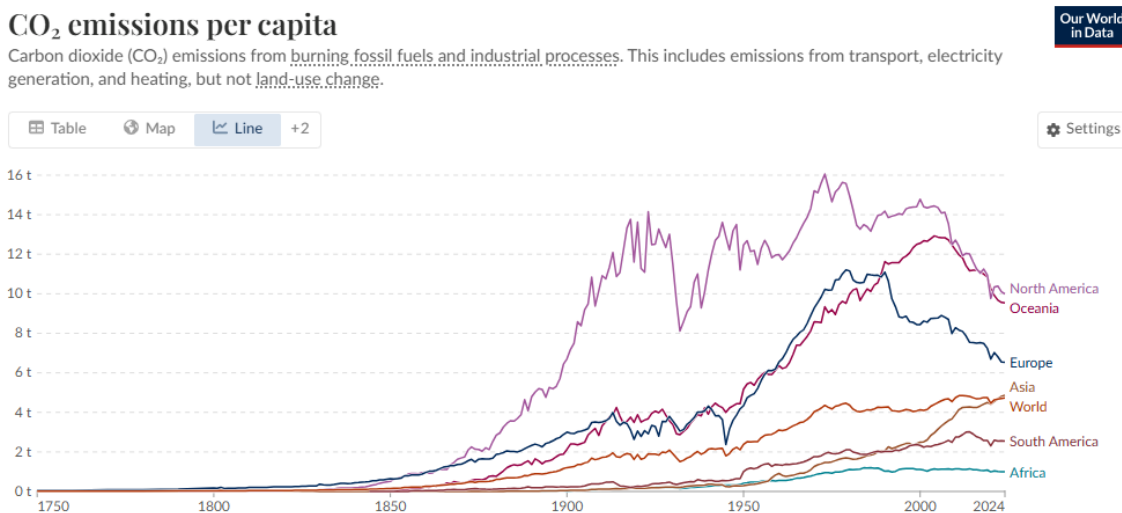
Além das emissões na queima final, é preciso considerar os impactos ao longo da cadeia produtiva: produção, transporte e processamento de óleo e gás são responsáveis por aproximadamente 15% das emissões globais relacionadas à energia, equivalentes a cerca de 5,1 bilhões de toneladas de CO₂ equivalente por ano.

Essas emissões incluem queima em tochas (*flaring*), vazamentos e emissões fugitivas de metano, um gás de efeito estufa com potencial de aquecimento muito superior ao do CO₂ em horizontes temporais mais curtos.

O aumento contínuo das concentrações de CO₂ pode ser visualizado com clareza nos dados compilados pelo *Our World in Data*, que reúnem séries longas de medições atmosféricas e de emissões históricas. Os gráficos de concentração e emissão de CO₂ mostram uma trajetória ascendente acentuada ao longo do século XX, com aceleração mais intensa a partir da segunda metade do século, culminando em valores acima de 420 ppm na década de 2020. Como demonstrado no Gráfico 3 - Evolução das emissões per capita de CO₂ por região (1750–2024), as emissões apresentam forte disparidade

regional, com destaque para América do Norte e Oceania, que historicamente exibem os maiores níveis per capita, seguidas pela Europa, enquanto Ásia e América do Sul mantêm trajetórias de crescimento mais recente, e a África, os menores índices globais.

Gráfico 3 - Evolução das emissões per capita de CO₂ por região (1750–2024)

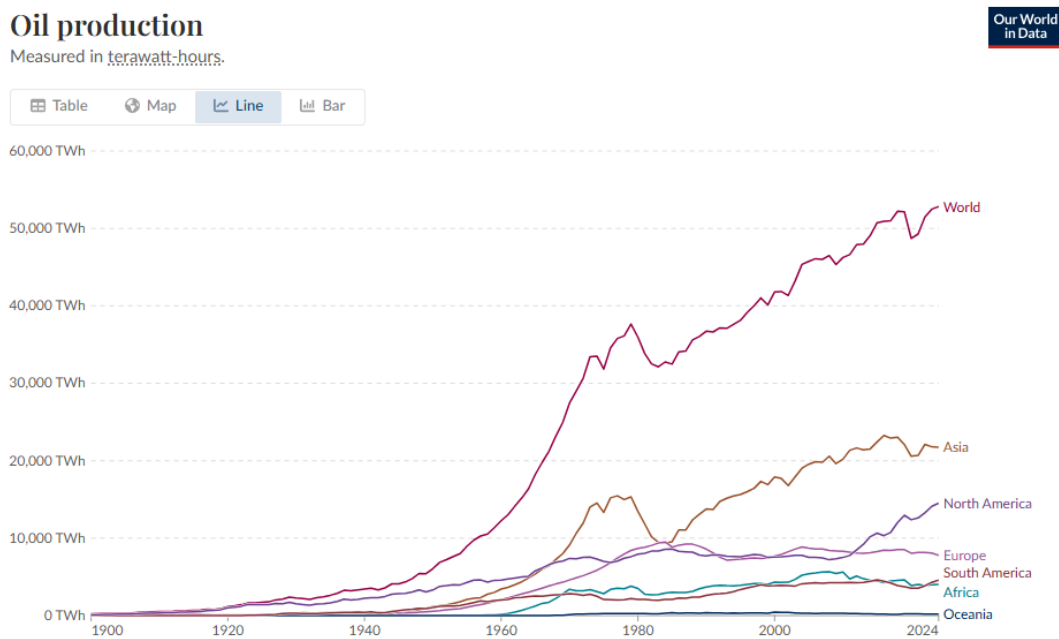


Fonte: Global Carbon Budget (2025); Population based on various sources (2024) OurWorldinData.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions | CC BY

Esse comportamento não é apenas um indicador abstrato: está diretamente associado ao aumento da temperatura média global, ao aquecimento dos oceanos e à intensificação de eventos climáticos extremos, reforçando o vínculo estrutural entre a expansão do uso de combustíveis fósseis, em especial o petróleo, e a crise climática contemporânea.

De forma complementar, os dados de consumo de petróleo também evidenciam o papel central desse combustível nos impactos ambientais. Séries históricas de consumo global de combustíveis fósseis por fonte mostram que, nas últimas décadas, a demanda por petróleo se manteve em patamar elevado e em trajetória de crescimento, ainda que com oscilações conjunturais. Estudos do *Our World in Data*, com base na *Statistical Review of World Energy*, apontam que o consumo de combustíveis fósseis aumentou cerca de oito vezes desde 1950, tendo aproximadamente dobrado desde 1980, com o petróleo e o gás natural ainda apresentando crescimento significativo, como demonstrado no Gráfico 4 – Evolução da produção de petróleo no mundo, por região (1900–2024).

Gráfico 4 - Evolução da produção de petróleo no mundo, por região (1900–2024).



Fonte: Energy Institute - Statistical Review of World Energy (2025); The Shift Data Portal (2019)

OurWorldinData.org/fossil-fuels | CC BY

Em termos de participação na matriz energética, o petróleo representa, em média, cerca de 30% da energia primária global, mantendo-se como a principal fonte isolada de energia em boa parte do período recente.

Nesse contexto, a utilização, de um gráfico da evolução da concentração de CO₂ e de um gráfico da evolução do consumo de petróleo, ambos obtidos no *Our World in Data*, é fundamental para ilustrar visualmente essa correlação: de um lado, a curva ascendente de emissões e concentrações de CO₂; de outro, o crescimento da demanda por petróleo como fonte de energia e insumo industrial. A leitura conjunta dessas figuras reforça a ideia de que as emissões associadas ao setor não são um fenômeno isolado, mas parte de uma trajetória histórica de dependência estrutural de combustíveis fósseis.

Ao mesmo tempo, o setor petrolífero tem intensificado investimentos em pesquisa, desenvolvimento e inovação (*P&D/I*), tanto para aumentar a eficiência econômica de suas operações quanto para responder às crescentes pressões regulatórias e sociais relacionadas à sustentabilidade. De acordo com a IEA sobre orçamentos de *P&D* em energia indicam que o gasto corporativo em *P&D* energético atingiu aproximadamente 94

bilhões de dólares em 2018, sendo que cerca de um terço desse montante foi direcionado a tecnologias de baixo carbono. Dentro desse total, as empresas de exploração e produção de petróleo e gás voltaram a registrar crescimento real de investimento em *P&D*, em torno de 1% em 2018, após vários anos de queda, ainda que os níveis permanecessem cerca de 45% abaixo dos patamares de 2014.

Mais recentemente, observa-se um movimento explícito de vincular parcela crescente dos investimentos à agenda de sustentabilidade. A IEA estima que, em 2022, os investimentos em energia limpa realizados por empresas de petróleo e gás corresponderam a aproximadamente 2,5% do total de seus gastos de capital, proporção ainda modesta, mas superior à verificada em anos anteriores. Em cenários compatíveis com a neutralidade de emissões até 2050, projeta-se que essa participação teria de se elevar para cerca de 50% do capital investido até 2030, o que sinaliza a necessidade de uma reorientação profunda da estratégia de investimento do setor.

No mesmo sentido, estimativas de cenários de transição energética indicam que, para manter a atual participação de cerca de 30% nos investimentos globais em tecnologias de captura, uso e armazenamento de carbono (CCUS), a indústria do petróleo deveria investir aproximadamente 25 bilhões de dólares por ano apenas em CCUS até 2030, além de cerca de 19 bilhões de dólares anuais em hidrogênio de baixo carbono. Como aponta Smil (2017), a descarbonização das matrizes energéticas exige um esforço financeiro e tecnológico sem precedentes, e setores intensivos em carbono, como o petrolífero, precisarão direcionar parte significativa de seus investimentos à inovação limpa para evitar a obsolescência de seus modelos produtivos.

Além das projeções agregadas, iniciativas voluntárias de grandes empresas reforçam o aumento recente nos gastos relacionados à sustentabilidade. A *Oil and Gas Climate Initiative (OGCI)*, que reúne 12 das maiores companhias do setor, reporta que, em 2023, seus membros investiram cerca de 29,7 bilhões de dólares em negócios e projetos de baixo carbono, valor 15% superior ao de 2022, acumulando quase 96 bilhões de dólares em investimentos de baixo carbono desde 2017, incluindo aquisições e *P&D*. Como observa Porter e Kramer (2011), investimentos corporativos em sustentabilidade não devem ser entendidos apenas como custos de conformidade, mas como estratégias

de criação de valor compartilhado, nas quais a inovação ambiental fortalece a competitividade e a legitimidade social das empresas no longo prazo.

Esses recursos têm sido direcionados a áreas como energias renováveis, captura de carbono, hidrogênio de baixo carbono, eficiência energética e redução de emissões de metano nas operações. Em escala nacional, podem ser citados exemplos pontuais, como projetos de *P&D/I* no Brasil voltados para captura direta de CO₂ do ar (*Direct Air Carbon Capture and Storage – DACCS*), com investimentos estimados em vários milhões de reais em parceria entre empresas petrolíferas e universidades, evidenciando a tentativa de aproximar a agenda tecnológica do setor de objetivos climáticos. Conforme analisa Freeman (1997), a inovação tecnológica desempenha papel decisivo na reestruturação de sistemas produtivos, permitindo que setores tradicionais, como o de petróleo, incorporem avanços que não apenas aumentam sua eficiência, mas também favorecem sua adaptação a novas exigências ambientais e regulatórias.

Apesar desse aumento dos gastos vinculados à sustentabilidade, as estatísticas mostram que tais investimentos ainda representam uma fração relativamente pequena diante dos fluxos de capital direcionados à exploração e produção convencionais de petróleo e gás. Em outras palavras, há um descompasso entre a escala dos impactos ambientais, expressa em gigatoneladas de emissões e no avanço recorde das concentrações de CO₂, e a escala dos investimentos em inovação ambientalmente orientada. A análise dos impactos ambientais do setor, articulada a esses dados de investimento em *P&D* e tecnologias limpas, permite problematizar até que ponto o movimento atual da indústria configura uma transformação estrutural rumo à sustentabilidade ou se permanece, em grande medida, como uma estratégia incremental de mitigação de riscos regulatórios e reputacionais.

3.2 Mitigação dos Impactos e a Longevidade do Uso do Petróleo

A perspectiva econômica de Stern (2006) é direta: os custos agregados da mudança do clima, se não enfrentados, superam amplamente os custos de mitigação e adaptação implementados desde já. Aplicada à indústria do petróleo, essa tese impõe uma inflexão de racionalidade: reduzir emissões e riscos ambientais não é apenas gesto

reputacional, mas decisão de preservação de valor. Em cadeias caracterizadas por ativos de vida útil longa, adiar o ajuste implica imobilizar capital em tecnologias que podem se tornar antieconômicas sob regimes de carbono mais estritos, além de expor empresas a passivos ambientais, litígios e perda de acesso a mercados que incorporam critérios de descarbonização.

A mitigação imediata concentra-se, em primeiro lugar, no metano. Por seu alto potencial de aquecimento em horizontes de 20 anos, pequenas reduções de metano produzem ganhos climáticos significativos. Programas de detecção e reparo de vazamentos com sensores, imagens hiper espectrais e análise de dados, vedação de componentes críticos, captura e uso do gás associado, e a eliminação do venting e do flaring rotineiros compõem um pacote de abatement com relação custo-benefício favorável. Ao mesmo tempo, eletrificar plataformas e unidades de processamento com suprimento de baixa intensidade de carbono, conectando-se ao *grid* renovável onshore ou a parques eólicos *offshore*, reduz emissões diretas, melhora a eficiência e pode gerar cobenefícios operacionais, ou seja, menos ruído e vibração, menor manutenção de turbomáquinas.

Outra frente essencial é a gestão de água e resíduos ao longo do ciclo do poço e do refino. Tecnologias de separação avançada, reinjeção e reuso da água produzida, monitoramento em tempo real de efluentes e coprocessamento de resíduos em refinarias reduzem riscos de contaminação e custos de disposição. No fim do ciclo, abandono e descomissionamento planejados, com avaliações ecológicas e estratégias de reuso de infraestrutura, por exemplo, para armazenamento de CO₂ em reservatórios exauridos ou suporte a eólica *offshore*, minimizam emissões fugitivas tardias e transformam passivos em ativos habilitadores da transição.

A dimensão institucional organiza e escala esses esforços. A precificação de carbono, por taxas, sistemas *cap-and-trade* ou mercados regulados de créditos, internaliza externalidades e desloca a fronteira de viabilidade de projetos de eficiência e descarbonização. Padrões de divulgação e governança, metas intermediárias auditáveis e compromissos de ciência, trajetórias validadas por iniciativas como SBTi, elevam a qualidade da informação e disciplinam promessas de neutralidade. Em paralelo,

cláusulas contratuais em cadeias de suprimento, taxonomias de finanças sustentáveis e compras públicas com critérios ambientais criam demanda por soluções de baixo carbono, induzindo inovação em fornecedores.

A noção de “longevidade compatível” do uso do petróleo se define, então, menos pela quantidade absoluta produzida e mais pela trajetória de emissões e pela velocidade de substituição relativa. Em termos práticos, essa compatibilidade exige três condições simultâneas: queda consistente da intensidade de emissões por barril, pela melhoria operacional e pelo uso de eletricidade de baixo carbono, redução da participação do petróleo na matriz energética total, pela expansão de renováveis, eletrificação e eficiência, e metas intermediárias de descarbonização, transparentes e verificáveis, que confirmam credibilidade ao caminho até o net zero. Para nichos de difícil substituição, aviação, navegação, alguns processos industriais e a petroquímica, *CCUS*, combustíveis sustentáveis de aviação (*SAF*) e e-combustíveis baseados em hidrogênio e CO₂ de origem biogênica ou capturado funcionam como pontes tecnológicas, evitando rupturas abruptas em cadeias críticas.

No plano social, a transição precisa ser justa. Regiões e trabalhadores densamente conectados à cadeia do petróleo não podem ser convidados a “pagar a conta” de um processo sobre o qual têm pouco controle. Programas de requalificação, apoio a arranjos produtivos locais, uso de receitas extraordinárias para financiar infraestrutura verde e critérios de localidade em leilões e concessões ajudam a amortecer impactos e a construir coalizões políticas para o avanço regulatório. Sob a ótica de Stern (2006), internalizar os custos climáticos na conta econômica geral é a forma mais eficiente de orientar decisões privadas na direção do interesse coletivo, e a previsibilidade regulatória reduz o custo de capital necessário para a transição.

O Brasil tem condições específicas para transformar mitigação em vantagem comparativa. A alta participação de fontes renováveis na eletricidade, a experiência em bioenergia, os *clusters* de engenharia *offshore* e a possibilidade de desenvolver *hubs* de *CCUS* em sinergia com o descomissionamento criam um ambiente favorável. A eletrificação de plataformas, a redução acelerada de *flaring*, a reinjeção de CO₂ e a adoção de métricas robustas de metano podem reduzir a pegada de carbono do barril

brasileiro e preservar acesso a mercados mais exigentes. Ao mesmo tempo, aprimorar o desenho de um mercado de carbono, direcionar *P&D* regulado para mitigação e digitalização, e fortalecer padrões de transparência consolidam a credibilidade do percurso.

Em síntese, a lógica econômica de Stern (2006) sustenta que agir cedo e de forma coordenada é a opção menos custosa no horizonte relevante. Para a indústria do petróleo, isso significa transformar mitigação em condição de licença para operar no curto prazo, enquanto se prepara, sem ilusões, para uma perda de centralidade no longo prazo, administrando o declínio relativo com disciplina financeira, inovação e responsabilidade social.

3.3 Tecnologias e Fontes Sustentáveis

Rifkin (2011) interpreta a transição em curso como uma reconfiguração sistêmica que combina energia limpa de baixo custo marginal, digitalização capilarizada e redes inteligentes, redesenhando o papel de consumidores, empresas e territórios. Em vez de um sistema centralizado, unidirecional e intensivo em combustíveis fósseis, emerge uma arquitetura distribuída, interconectada e cada vez mais limpa, em que produção, consumo, armazenamento e troca de energia são coordenados por dados. Essa leitura é útil porque desloca o foco do “que substituir” para “como reorganizar o sistema” a fim de entregar o mesmo serviço energético, calor, luz, mobilidade, processos industriais, com menor pegada.

Na dimensão da oferta, a combinação de solar fotovoltaica e eólica, *onshore* e *offshore*, expandiu-se pela queda persistente de custos, pelo ganho de fator de capacidade e pela difusão de modelos contratuais que reduzem risco. Em ambientes marítimos, sinergias com competências de engenharia *offshore* do setor de petróleo, fundações, logística, operação e manutenção em alto-mar, encurtam curvas de aprendizado e criam oportunidades de requalificação profissional. A hibridização de fontes e o acoplamento com armazenamento atenuam a intermitência e aliviam a necessidade de *backup* fóssil; a expansão de linhas de transmissão e a modernização do despacho completam o quadro físico.

O armazenamento, por sua vez, deixa de ser acessório e passa a ser elemento estruturante. Baterias estacionárias, soluções térmicas e hidrelétricas reversíveis permitem deslocar energia no tempo, prestar serviços ancilares e aumentar a resiliência diante de eventos climáticos extremos. Novas arquiteturas de mercado, leilões de capacidade e de flexibilidade, remuneração por serviços de rede, tornam financeiramente viável a participação de múltiplos agentes. Do lado da demanda, redes inteligentes e medição avançada viabilizam gestão ativa de cargas, resposta a preços e agregadores de flexibilidade, abrindo espaço para consumidores-provedores (*prosumers*) e microrredes críticas.

Uma segunda alavanca tecnológica é o hidrogênio de baixo carbono. Quando produzido por eletrólise alimentada por renováveis, o chamado hidrogênio verde, torna-se vetor de descarbonização de usos industriais difíceis de eletrificar diretamente, siderurgia, química pesada, fertilizantes. E, combinado com CO₂ biogênico ou capturado, permite a produção de e-combustíveis (metanol, e-querosene, e-diesel). Em regiões com disponibilidade de gás natural e infraestrutura existente, rotas de hidrogênio azul ou turquesa podem operar como transições, desde que controladas as emissões de metano e asseguradas taxas elevadas de captura. Portos industriais com acesso a renováveis competitivas podem se tornar plataformas de exportação de hidrogênio e derivados, conectando cadeias globais de valor.

Para a aviação e a navegação, setores de difícil substituição, os combustíveis sustentáveis (*SAF*) e e-combustíveis são peças-chave. Rotas tecnológicas como *HEFA*, *Fischer-Tropsch* e “álcoois para jato” permitem reduzir a intensidade de carbono sem exigir transformações imediatas em toda a frota, desde que apoiadas por padronização, certificação, contratos de longo prazo e políticas de *blending* progressivo. A consolidação de mercados para esses combustíveis depende de previsibilidade regulatória e de instrumentos financeiros que reduzam o diferencial de custo em relação aos fósseis.

A captura, uso e armazenamento de carbono (*CCUS*) figura como tecnologia de ponte para setores “*hard-to-abate*” e como serviço transversal de descarbonização, especialmente quando integrada a reservatórios exauridos ou aquíferos salinos com boa capacidade de confinamento. Embora não substitua a necessidade de reduzir emissões

na fonte, o *CCUS* contribui para viabilizar metas setoriais e para dar destino permanente ao CO₂ inevitável. Em paralelo, a captura direta do ar (*DAC*) permanece cara, mas pode ganhar relevância em portfólios de neutralidade onde a remoção efetiva e verificável se torne exigência regulatória. Soluções baseadas na natureza, reflorestamento, restauração de manguezais, manejo de solos, agregam co-benefícios de biodiversidade e serviços ecossistêmicos, desde que ancoradas em critérios de adicionalidade, permanência e monitoramento robusto.

A digitalização amarra essas peças. Modelos de previsão e otimização, manutenção preditiva, controle avançado de processos, *trading* algorítmico de energia e plataformas de agregação de recursos distribuídos reduzem custos, ampliam a confiabilidade e aceleram o aprendizado. No plano industrial, intensificação de processos, novos catalisadores, manufatura aditiva e materiais avançados estendem a vida útil de equipamentos e diminuem perdas. A integração entre dados e ativos físicos, o “gêmeo digital”, permite simular, testar e ajustar operações antes de investir pesadamente, reduzindo riscos.

O Brasil, nesse tabuleiro, dispõe de uma combinação rara de recursos e competências. A eletricidade majoritariamente renovável, a experiência acumulada em biocombustíveis, o potencial eólico *offshore*, a disponibilidade de áreas para projetos fotovoltaicos de grande escala e a base industrial conectada a cadeias de petróleo e gás criam um ambiente para soluções híbridas: biorrefino, *hubs* de hidrogênio em portos industriais, eletrificação de ativos *offshore* com eólica, coprocessamento em refinarias e arranjos de *CCUS* ancorados em áreas maduras. A política pública pode transformar essas vantagens naturais em liderança tecnológica exportável por meio de planejamento de longo prazo, sinal econômico ao carbono, financiamento verde, *P&D* orientado a desafios e mecanismos de desenvolvimento regional que promovam transição justa.

A leitura de Rifkin (2011) ajuda a ver que o valor migra para as interfaces: onde energia limpa, dados e redes se combinam para entregar confiabilidade e custo baixo com pegada mínima. A transição, portanto, não é soma de projetos isolados, mas a criação de um ecossistema no qual tecnologias, instituições e mercados se reforçam mutuamente. Ao fim, o sucesso será mensurado por indicadores objetivos, intensidade

de emissões, custo total do serviço energético, acesso universal e resiliência, e não apenas por anúncios. Integrar essas tecnologias com disciplina econômica e previsibilidade regulatória é o caminho para que a nova matriz energética seja, ao mesmo tempo, viável, inclusiva e sustentável.

CONCLUSÃO

Ao longo desta monografia, foi possível compreender que a indústria do petróleo ocupa um papel paradoxal no cenário contemporâneo: ao mesmo tempo em que sustenta parte significativa da economia mundial, é também uma das principais fontes de impactos ambientais e de emissões de gases de efeito estufa. Esse contraste evidencia o grande desafio do setor no século XXI, equilibrar sua relevância econômica com as exigências impostas pela sustentabilidade e pela transição energética global. A análise apresentada demonstrou que, embora o petróleo continue sendo um pilar estratégico do desenvolvimento industrial, a continuidade desse modelo, sem adaptação, torna-se cada vez mais inviável diante das pressões ambientais, sociais e regulatórias.

A questão central, de que maneira a indústria do petróleo pode se aproximar de práticas mais sustentáveis, mostrou-se complexa, mas não intransponível. O primeiro passo está na compreensão de que sustentabilidade, no contexto petrolífero, não significa simplesmente a eliminação imediata dos combustíveis fósseis, mas a construção de um processo gradual de redução de impactos e diversificação energética. O setor pode se aproximar de práticas sustentáveis ao investir em eficiência operacional, na redução de emissões de metano e na eliminação do *flaring*, ao mesmo tempo em que amplia sua participação em projetos de energia limpa, como solar e eólica, e no desenvolvimento de biocombustíveis avançados. Essa transição exige mudanças na lógica de investimento e de governança das empresas, incorporando critérios ambientais e sociais como dimensões estratégicas de competitividade e não apenas de reputação.

Outro ponto fundamental é o papel da inovação tecnológica como motor dessa transformação. As inovações recentes em captura e armazenamento de carbono (CCUS), hidrogênio de baixo carbono, eletrificação de plataformas e digitalização de processos demonstram que a tecnologia é um instrumento decisivo para compatibilizar a operação da indústria com as metas globais de descarbonização. No entanto, essas soluções só terão impacto significativo se forem acompanhadas de políticas públicas claras, marcos regulatórios consistentes e mecanismos de financiamento que tornem os investimentos sustentáveis viáveis no longo prazo. A inovação, isoladamente, não basta,

ela precisa estar inserida em um ecossistema que premie a eficiência, a transparência e o compromisso com a mitigação climática.

A transformação do setor também passa por uma mudança cultural e institucional. A sustentabilidade deve deixar de ser vista como um custo e passar a ser compreendida como um vetor de geração de valor e longevidade empresarial. O futuro das companhias petrolíferas dependerá de sua capacidade de antecipar tendências, diversificar portfólios e adaptar-se a um ambiente de transição acelerada, em que o capital e o consumo tenderão a se concentrar em atividades de baixo carbono. Aquelas que resistirem a esse movimento correm o risco de ver seus ativos se tornarem obsoletos e suas operações inviáveis em um cenário de crescente restrição de emissões.

No caso do Brasil, a situação assume contornos particulares. O país possui uma das matrizes elétricas mais limpas do mundo, uma sólida base em bioenergia e um potencial expressivo em fontes renováveis, como eólicas *offshore* e solar fotovoltaicos. Ao mesmo tempo, o pré-sal representa uma das maiores fontes de receita e de poder estratégico nacional. Essa dualidade impõe a necessidade de uma estratégia equilibrada, capaz de aproveitar os ganhos econômicos do petróleo para financiar a transição energética e fortalecer as cadeias de inovação sustentável. O desafio brasileiro é transformar sua vantagem natural em liderança tecnológica, promovendo uma transição justa, que gere empregos, reduza desigualdades e assegure a segurança energética.

Em última análise, a indústria do petróleo encontra-se diante de um ponto de inflexão. O caminho para a sustentabilidade não depende apenas de vontade política ou de avanços tecnológicos, mas da capacidade coletiva, governos, empresas e sociedade, de reconhecer que o tempo de agir é agora. A transição energética não é uma ameaça à indústria, mas uma oportunidade de reinvenção. O setor que durante mais de um século impulsionou o crescimento econômico mundial tem agora a chance de contribuir para a construção de um modelo de desenvolvimento mais equilibrado, resiliente e responsável.

Conclui-se, portanto, que a aproximação da indústria do petróleo com práticas sustentáveis e o papel das inovações tecnológicas na sua transformação representam não apenas uma exigência ética ou ambiental, mas uma condição de sobrevivência

econômica e institucional. O futuro dessa indústria dependerá de sua habilidade em converter conhecimento e recursos em soluções que permitam mitigar danos, reduzir emissões e viabilizar uma transição energética justa e realista. A sustentabilidade, nesse sentido, não é o fim da indústria do petróleo, mas o início de uma nova fase, em que a energia e a responsabilidade ambiental caminham lado a lado como fundamentos de um desenvolvimento verdadeiramente duradouro.

Referências Bibliográficas:

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). **Relatório de Investimentos em Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (P,D&I) da Indústria do Petróleo e Gás Natural**. Brasília: ANP, 2023.

ENERGY INSTITUTE. **Statistical Review of World Energy 2024: 73rd edition**. London: Energy Institute, 2024. Disponível em: <https://www.energyinst.org/statistical-review>. Acesso em: 13 nov. 2025.

FREEMAN, Chris; SOETE, Luc. **The economics of industrial innovation**. 3. ed. Cambridge, MA: MIT Press, 1997.

GOLDEMBERG, José. **Ethanol for a sustainable energy future**. *Science*, v. 315, n. 5813, p. 808–810, 2008.

GOLDEMBERG, José; LUCON, Oswaldo. **Energia e meio ambiente no Brasil**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2008.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Energy Technology RD&D Budgets: Overview**. Paris: IEA, 2020. Disponível em: [https://iea.blob.core.windows.net/assets/b6e2d46e-9808-4118-9dae-6cf3f589bb7c/Energy Technology RDD 2020 Overview1.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/b6e2d46e-9808-4118-9dae-6cf3f589bb7c/Energy_Technology_RDD_2020_Overview1.pdf). Acesso em: 13 nov. 2025.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **CO₂ emissions in 2023**. Paris: IEA, 2024. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2023>. Acesso em: 13 nov. 2025.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **The oil and gas industry in net zero transitions**. Paris: IEA, 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/the-oil-and-gas-industry-in-net-zero-transitions>. Acesso em: 13 nov. 2025.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável**. Brasília: Nações Unidas, 2015. Disponível em: <https://brasil.un.org/sites/default/files/2020-09/agenda2030-pt-br.pdf>. Acesso em: 13 nov. 2025.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS NO BRASIL. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. Brasília: ONU Brasil**, [s.d.]. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 13 nov. 2025.

OIL AND GAS CLIMATE INITIATIVE. **Gaining momentum: Progress Report 2024**. Londres: OGCI, 2024. Disponível em: <https://www.ogci.com/progress-report/gaining-momentum>. Acesso em: 13 nov. 2025.

OUR WORLD IN DATA. **CO₂ and greenhouse gas emissions**. Our World in Data, 2020. Disponível em: <https://ourworldindata.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions>. Acesso em: 13 nov. 2025.

OUR WORLD IN DATA. **Carbon dioxide concentrations in the atmosphere (dataset “co2-long-term-concentration”)**. Our World in Data, 2024. Disponível em: <https://ourworldindata.org/grapher/co2-long-term-concentration>. Acesso em: 13 nov. 2025.

OUR WORLD IN DATA. **Oil consumption by country (dataset “oil-consumption-by-country”)**. Our World in Data, 2024. Disponível em: <https://ourworldindata.org/grapher/oil-consumption-by-country>. Acesso em: 13 nov. 2025.

PETROBRAS. **Relatório de Sustentabilidade 2023**. Rio de Janeiro: Petrobras, 2024.

PINTO JR., Helder Queiroz; PARENTE, Virginia; ARAÚJO, Jorge Luiz de; MATTOS, Carlos Augusto. **Economia da energia: fundamentos econômicos, evolução histórica e organização industrial**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007.

PORTER, Michael E.; KRAMER, Mark R. **Creating Shared Value: How to Reinvent Capitalism—and Unleash a Wave of Innovation and Growth**. *Harvard Business Review*, v. 89, n. 1/2, p. 62–77, 2011.

RIFKIN, Jeremy. **A terceira revolução industrial: como o poder lateral está transformando a energia, a economia e o mundo**. São Paulo: M. Books, 2011.

RITCHIE, Hannah; ROSER, Max. **CO₂ emissions**. Our World in Data, 2020. Disponível em: <https://ourworldindata.org/co2-emissions>. Acesso em: 13 nov. 2025.

SACHS, Jeffrey D. **The age of sustainable development**. New York: Columbia University Press, 2015.

STERN, Nicholas. **The economics of climate change: the Stern review**. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.

UNITED NATIONS. **Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. Resolution A/RES/70/1, 25 Sept. 2015**. New York: United Nations, 2015. Disponível em: https://www.un.org/en/development/desa/population/migration/generalassembly/docs/globalcompact/A_RES_70_1_E.pdf. Acesso em: 13 nov. 2025.

YERGIN, Daniel. **The prize: the epic quest for oil, money and power**. New York: Simon & Schuster, 1991.