

Trilema da Energia: uma perspectiva no contexto das mudanças ambientais globais

RESUMO

Felipe Husadel Poyer

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, São Paulo, Brasil
felipe.poyer@inpe.br

Meiriele Alvarenga Cumplido

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, São Paulo, Brasil
meiriele.cumplido@inpe.br

André Rodrigues Gonçalves

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, São Paulo, Brasil
andre.goncalves@inpe.br

Lincoln Muniz Alves

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, São Paulo, Brasil
lincoln.alves@inpe.br

Rodrigo Santos Costa

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, São Paulo, Brasil
rodrigo.costa@inpe.br

Fernando Ramos Martins

Instituto do Mar, Universidade Federal de São Paulo, Campus Baixada Santista, Santos, São Paulo
fernando.martins@unifesp.br

Enio Bueno Pereira

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, São Paulo, Brasil
enio.pereira@alumni.usp.br

No setor de energia, o trilema é caracterizado como sendo as correlações entre segurança energética, equidade energética e sustentabilidade ambiental. Devido à crescente preocupação com relação às mudanças ambientais globais, o peso atribuído ao pilar ambiental tem aumentado e criado um novo ponto de equilíbrio para o trilema. Isso tem pressionado a transição energética, embora as ações de muitas nações ainda não estejam alinhadas com a urgência ambiental atual. Com base em uma revisão de literatura, este artigo apresenta uma caracterização do trilema da energia, visando entender como as mudanças ambientais têm o impactado na sociedade, considerando tanto a perspectiva global como brasileira. É possível concluir que as relações entre os temas que compõem o trilema de energia são complexas e devem ser balanceadas refletindo as características, necessidades e disponibilidades tecnológicas de cada região, não sendo plausível uma solução única global para esse balanço.

PALAVRAS-CHAVE: Transição Energética. Planejamento Energético. Segurança Energética. Equidade Energética. Sustentabilidade Ambiental.

INTRODUÇÃO

As mudanças ambientais compreendem transformações nos padrões da atmosfera, hidrosfera, litosfera e biosfera. Pode-se citar como exemplo as mudanças no clima e a perda de biodiversidade. No passado geológico da Terra, estas transformações foram causadas principalmente pelas ações da água, gelo, vento, forças tectônicas, microrganismos e animais (MANNION, 2014). E ainda que essas mudanças sejam um processo natural contínuo, permanecem diversas lacunas de conhecimento para entender a dimensão da contribuição humana nas transformações destes processos naturais (LUTZENHISER et al., 1992; CASTREE, 2017). Compreender as consequências das ações antrópicas e as formas de mitigar seus impactos, visando garantir o equilíbrio do sistema terrestre, é uma das grandes questões da atualidade.

Preocupações com as relações entre preservação ambiental e crescimento econômico foram apresentadas no ano 1972, no livro *The Limits to Growth* (MEADOW et al., 1972). Em 1987, o conceito de desenvolvimento sustentável é publicado pela Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, no relatório *Our Common Future* (WCED, 1987), como sendo: “O desenvolvimento que encontra as necessidades atuais sem comprometer a habilidade das futuras gerações de atender suas próprias necessidades”. Desde então, estas preocupações ganharam relevância com diversos estudos, que aprofundam os conhecimentos e atualizam as projeções referentes ao crescimento da atividade econômica e a oferta de recursos (TURNER, 2008; HERRINGTON, 2021; HALL, 2022).

Entender que os recursos do planeta Terra têm limites e que não devem ser explorados de forma predatória é importante para justificar a busca pelo aumento da sustentabilidade ambiental nos processos produtivos (MURPHY et al., 2021). Rockstrom et al. (2009) apresentaram em seu trabalho uma proposta para definir os limites planetários de alguns processos do sistema terrestre. Os autores apontaram que, ao cruzar esses limites, mudanças ambientais irreversíveis poderiam ocorrer, colocando em risco a humanidade (STEFFEN et al., 2015; PERSSON et al., 2022).

A ciência indica, há mais de um século (ARRHENIUS, 1896), que o aumento das concentrações dos Gases de Efeito Estufa (GEE) na atmosfera é responsável pela elevação da temperatura média do sistema terrestre e que, desde a primeira Revolução Industrial, as contribuições humanas para o aumento dessas emissões crescem continuamente. Os efeitos das alterações ambientais já são percebidos nas vidas das pessoas e ocorrem com uma frequência cada vez maior (IPBES, 2019; IPCC, 2021).

Reduzir as emissões de GEE é um desafio que precisa ser enfrentado pela humanidade, envolvendo mudanças econômicas, tecnológicas e sociais que impactam diretamente o modo de vida atual. Esse desafio tem sido considerado na definição e elaboração das políticas públicas mundiais, e recentemente vários países assumiram compromissos visando contribuir para uma redução na concentração destes gases na atmosfera (ARES, 2021; IPCC, 2022).

O setor de energia é um dos responsáveis pelas emissões globais de GEE, e as economias de muitos países são dependentes da energia oriunda da queima de combustíveis fósseis. Conseqüentemente, para atender às metas de redução de

emissões, esses países precisam rever suas formas de gerar e consumir energia (FRIEDLINGSTEIN et al., 2022). A transição energética para uma matriz de baixo carbono é um movimento mundial, e vem se tornando possível devido aos avanços tecnológicos e à redução nos custos das cadeias produtivas (EPE, 2020; IEA, 2022; IRENA, 2022).

O planejamento do setor de energia é um processo dinâmico, que busca abarcar as transformações tecnológicas e sociais, fazendo com que o recurso energético seja disponibilizado de maneira confiável, acessível e com menor impacto sobre o meio natural. Estes três temas caracterizam o trilema da energia e, à medida que os efeitos negativos das mudanças ambientais se tornam mais presentes, buscar o equilíbrio entre os temas é imprescindível para garantir a segurança energética e atender aos requisitos sociais e ambientais atuais (PLIOUSIS et al., 2019; WEC, 2022).

Este trabalho visa entender, com base em uma revisão de literatura, como as mudanças ambientais globais têm influenciado o trilema da energia na sociedade, especificamente sobre os impactos da transição energética para uma matriz com tecnologias de baixo carbono. Para tanto, nos tópicos seguintes são apresentados: os principais conceitos do trilema da energia e as correlações entre eles; os compromissos globais em interface com o trilema da energia; as considerações sobre a transição energética em atendimento aos compromissos globais. Dentre eles, pondera-se sobre a situação da maioria dos países e as particularidades do caso brasileiro.

TRILEMA DA ENERGIA

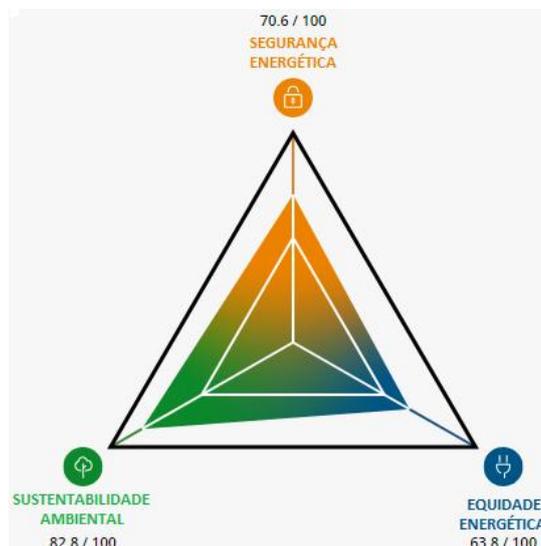
Segundo Alves (2015), o termo trilema é usado quando ocorre uma proposição baseada em três temas contraditórios ou conflitantes, sendo difícil a escolha entre eles. Já Rodrick (2007) aponta que trilema é um “teorema de impossibilidades”, sendo possível combinar quaisquer dois temas, mas nunca os três de maneira simultânea e completa.

No setor energético, segundo o *World Energy Council* (WEC), o trilema da energia é caracterizado com base na interação entre segurança energética, equidade energética e sustentabilidade ambiental, conforme ilustrado na Figura 1. Segurança energética se refere à capacidade de um país atender, de maneira confiável, a demanda por energia atual e futura. A equidade energética é a disponibilização desta energia de maneira acessível e abundante para toda a sua população. Por fim, a sustentabilidade ambiental é garantir que a produção e o consumo desta energia ocorram respeitando o meio ambiente e minimizando seus impactos negativos (WEC, 2022).

Para mensurar o desempenho das nações no equilíbrio entre os três temas e avaliar a eficiência das diferentes políticas públicas, o WEC desenvolveu o Índice do Trilema da Energia (WETI, abreviação para *World Energy Trilemma Index*) que, baseado em métricas para cada um dos temas, calcula anualmente o ranking entre as nações. Para Segurança Energética são avaliados indicadores relacionados à manutenção e resiliência da infraestrutura do país; para Equidade Energética, o preço da energia para o consumidor final é um dos indicadores; e com relação à Sustentabilidade Ambiental, o enfoque é dado aos sistemas energéticos que evitam danos ambientais e mitigam as mudanças climáticas. No ano de 2022, o

desempenho do Brasil em cada um dos temas é indicado nos vértices do triângulo na Figura 1 e, conforme Tabela 1, o país ficou classificado em 28º lugar geral na lista com outros 127 países (WEC, 2022).

Figura 1 - Representação dos temas que compõem o trilema da energia, com a indicação de desempenho do Brasil em cada tema.



Fonte: Adaptado de WEC (2022)

Transformar a energia de sua fonte primária para seu uso final demanda recursos naturais e alterações do meio ambiente. Portanto, entender e mitigar os impactos destas transformações são questões importantes do processo produtivo. A busca crescente por recursos naturais para atender as demandas do setor energético está diretamente relacionada aos padrões de consumo da sociedade moderna e ao desenvolvimento econômico mundial. O estímulo constante por novos produtos e serviços pela população contribui para estes impactos, pois as atividades de produção e consumo demandam energia em seus processos (HALL, 2022; SERGI e CUNHA, 2020).

Kang (2022) afirma que, historicamente, energia e economia sempre apresentaram correlação e seu trabalho mostra as interdependências de cada uma das dimensões do trilema da energia com atividades econômicas. Outros autores trazem abordagens semelhantes: Le e Nguyen (2019) afirmam que, na maioria dos casos, existe uma correlação positiva entre segurança energética e crescimento econômico, implicando em maior possibilidade de desenvolvimento da economia quanto maior a oferta de energia. Em contrapartida, Demaria (2018) mostra que em muitos casos o desenvolvimento econômico é incompatível com sustentabilidade ambiental, pois as atividades econômicas tendem a causar impacto negativo ao meio ambiente. Já Ullah, Khan e Yoon (2021) sugerem que baixa equidade e acessibilidade energética podem estar atreladas a carências em infraestrutura e, conseqüentemente, com baixo desenvolvimento econômico.

As relações entre a demanda energética, o desenvolvimento econômico, o desenvolvimento social e o impacto ambiental, trazendo exemplos para a realidade brasileira, foram tópicos explorados em detalhes por Goldemberg e Lucon (2012). Eles destacam que nas populações dos países membros da Organização para Cooperação Econômica e Desenvolvimento (OECD, abreviação para *Organization for Economic Cooperation and Development*), o consumo per

capita é de 4 a 5 vezes superior ao das populações dos países com economias emergentes. Além disso, recomendam que países emergentes considerem ‘saltos’ tecnológicos como estratégia para maior eficiência energética, que tende a permitir maior nível de conforto com menor consumo *per capita* e menor impacto ao meio ambiente.

Tabela 1 - *Ranking* (parcial) de 2022 baseado no desempenho global do Índice do Trilema da Energia e posição baseada no desempenho em cada tema

Ranking	País	Nota Trilema	Ranking por categoria		
			Segurança Energética 	Equidade Energética 	Sustentabilidade Ambiental 
1	Suécia	84,3	4	19	1
2	Suíça	83,4	27	7	2
2	Dinamarca	83,3	14	11	4
3	Finlândia	82,7	3	23	13
4	Reino Unido	82,4	10	12	7
4	Canadá	82,3	1	12	26
5	Austria	82,2	9	13	11
6	Noruega	81,0	42	10	3
6	França	81,1	13	22	6
7	Alemanha	80,6	6	20	16
8	Nova Zelândia	80,3	18	15	18
9	Eslovênia	78,8	17	18	26
9	Estônia	78,7	22	20	21
10	Estados Unidos	78,5	2	9	56
28	BRASIL	69,8	12	67	8

Fonte: Adaptado de WEC (2022)

Nações com economias emergentes têm maior predisposição a investir recursos para obter maior segurança energética, visando o desenvolvimento econômico e social. O custo financeiro, no entanto, é muitas vezes considerado elevado para priorizar da mesma forma as questões ambientais (KHAN et al., 2021). Mesmo nações desenvolvidas podem mudar suas prioridades de acordo com alterações no cenário geopolítico mundial, como a recente revisão realizada pela União Europeia em sua política energética devido à diminuição da oferta do gás importado da Rússia (THOMSON, 2022).

Ainda que os aspectos econômicos permaneçam como um importante requisito das políticas públicas mundiais e do planejamento energético, impactando diretamente a forma como cada país estabelece seu trilema da energia (OLIVER e SOVACOOOL, 2017), preocupações com as mudanças ambientais globais têm ganho cada vez mais relevância. A atual crise climática, com graves consequências para a humanidade, tem corroborado para maior atenção na relação entre as contribuições antrópicas e a degradação do meio natural. Como efeito, a dimensão ambiental do trilema da energia passa a ter um protagonismo no avanço científico-tecnológico para as soluções energéticas que impulsionam e dão suporte a políticas públicas adotadas por parte das nações para assumir compromissos de redução das emissões de GEE.

COMPROMISSOS GLOBAIS EM INTERFACE COM O TRILEMA DA ENERGIA

Agenda 2030

Em 1945, após o fim da Segunda Guerra Mundial, foi criada a Organização das Nações Unidas (ONU), com o objetivo de mediar conflitos entre nações, promover ajuda humanitária e atuar na preservação dos direitos humanos. Hoje, a ONU é composta por 193 países membros e tem diversas iniciativas buscando promover um mundo melhor (ONU, 1945).

Segundo o conceito de “Fragmentação da Paz”, apresentado por Galtung (1969), não é possível afirmar que um indivíduo esteja em paz se, apesar de ele estar livre de violência, ele estiver inserido na extrema pobreza e sem perspectivas de melhoria. Para alcançar o bem-estar social verdadeiro é necessário que os indivíduos tenham condições mínimas de sobrevivência em diversas dimensões da vida humana (GALTUNG, 1969; VIEIRA, 2020).

Em linha com este conceito, no ano de 2015, a ONU lançou um programa mundial visando proporcionar o desenvolvimento de um mundo mais sustentável. O plano de ação foi chamado de Agenda 2030 e consiste de 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), os quais buscam promover os direitos humanos e equilibrar as dimensões econômica, social e ambiental (ONU, 2015).

Cada ODS é composto de metas que contribuem para atingir o objetivo geral do programa até o ano de 2030. O ODS nº 7 trata de Energia Limpa e Acessível, e visa assegurar o acesso a este recurso de maneira confiável, sustentável, a um custo acessível para todos (**trilema da energia**). Entre as metas específicas deste objetivo, a Agenda 2030 (ONU, 2015) estabelece que os países signatários devem:

- a) assegurar o acesso universal, confiável, moderno e a preços acessíveis a serviços de energia (**segurança e equidade energética**);
- b) aumentar substancialmente a participação de energias renováveis na matriz energética global (**sustentabilidade ambiental**);
- c) dobrar a taxa global de melhoria da eficiência energética;
- d) reforçar a cooperação internacional para facilitar o acesso à pesquisa e tecnologias de energia limpa, incluindo energias renováveis, eficiência energética e tecnologias de combustíveis fósseis avançadas e mais limpas, e promover o investimento em infraestrutura de energia e em tecnologias de energia limpa;
- e) expandir a infraestrutura e alterar a tecnologia para o fornecimento de serviços de energia modernos e sustentáveis para todos nos países em desenvolvimento (**segurança energética**), particularmente nos países menos desenvolvidos, nos pequenos Estados insulares em desenvolvimento e nos países em desenvolvimento sem litoral, de acordo com seus respectivos programas de apoio.

É possível perceber que o atendimento às metas do ODS nº 7 naturalmente promove a transição energética para uma matriz de baixo carbono e um novo equilíbrio das dimensões do trilema da energia, de modo que este ODS se configura como um mecanismo importante para motivar os países na procura por um sistema energético mais sustentável.

A implementação dos ODS também apresenta situações de conflito (NILSSON et al., 2016; PRADHAN et al., 2017; OLIVEIRA et al., 2019), tal como apresentado

no trilema da energia. Como exemplo, na medida em que mais pessoas têm acesso à energia pelo avanço no ODS nº 7 (Energia Limpa e Sustentável), contribuindo para uma maior equidade energética, coloca-se uma pressão adicional sobre as emissões (conflitante ao ODS nº 13 - Ação Contra a Mudança Global do Clima) e sobre a preservação ambiental (estipulada pelas ODS nº 14 - Vida na Água e nº 15 - Vida Terrestre). Além disso, ao passo que a segurança energética viabiliza o desenvolvimento econômico (LE e NGUYEN, 2019) (contemplado no ODS nº 8 - Trabalho Decente e Crescimento Econômico), também contribui para aumentar a pressão sobre o meio natural (DEMARIA, 2018).

Convenção Quadro das Nações Unidas

A Convenção Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (UNFCC, abreviação para *United Nations Framework Convention on Climate Change*) foi criada em 1992 e hoje é composta por 198 países membros, que visam prevenir interferências humanas perigosas no sistema climático (ONU, 1992).

Baseado em evidências científicas compiladas nos relatórios do Painel Intergovernamental para as Mudanças Climáticas (IPCC, abreviação para *International Panel for Climate Change*), os membros da UNFCC reconhecem que há uma crise climática e que é necessário reduzir as concentrações de GEE na atmosfera. Reconhecem também que os países desenvolvidos têm maior responsabilidade histórica pela emissão destes gases, cabendo uma compensação financeira por estas nações para viabilizar a ação climática nos países com economias emergentes.

Anualmente são feitas conferências entre os membros da UNFCC, chamadas Conferências das Partes (COP, abreviação para *Conference of Parties*), onde são discutidos e negociados os compromissos climáticos para atingir o objetivo comum. Em 2015, na COP 21 realizada em Paris, os países se comprometeram em limitar a temperatura média global da atmosfera abaixo dos 2°C em comparação com os níveis pré-industriais, com esforços para que o valor limite seja de 1,5°C até o final do século. E para viabilizar este objetivo, coube a cada país determinar suas metas domésticas visando reduzir as emissões, as chamadas Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDC, abreviação para *Nationally Determined Contributions*) (ONU, 2015).

Além dos grupos de trabalhos criados para debater os assuntos climáticos, desde 2012 foi criada a Plataforma Científica Política para Biodiversidade e Serviços Ecossistêmicos (IPBES, abreviação para *Intergovernmental Science Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*), que também faz parte da estrutura das Nações Unidas e tem o Brasil como um de seus 140 membros. Neste fórum são discutidos assuntos referentes à preservação da biodiversidade e dos serviços ecossistêmicos mundiais, visando desenvolver metas para mitigar os impactos antrópicos (IPBES, 2022).

Através das iniciativas apresentadas anteriormente, a agenda internacional mostra que as preocupações com as contribuições antrópicas para as mudanças ambientais globais estão em evidência e em discussão nas reuniões entre líderes mundiais. Ainda assim, as dificuldades para convergir os interesses individuais com os interesses coletivos continuam muito grandes (FREY e BURGESS, 2022), e os avanços estão aquém das metas estabelecidas e da urgência climática atual (IEA, 2023).

Brasil diante dos compromissos globais

Em 2022, o Brasil apresentou uma revisão da NDC previamente enviada, em que se comprometeu a reduzir em 37% suas emissões de GEE até o ano de 2025, e 50% até o ano de 2030, utilizando como referência o ano de 2005 para ambas as metas. O compromisso brasileiro ainda inclui uma meta de longo prazo, que é atingir a neutralidade de emissões até o ano de 2050 (BRASIL, 2022a).

No ano de 2021, durante a COP 26 em Glasgow, o Brasil e outros 150 países se comprometeram também a reduzir em 30% as emissões do metano (CH₄) até 2030, considerando o ano de 2020 como referência. O metano é um dos gases que contribuem para o aquecimento do planeta e, devido ao seu tempo de vida curto, aproximadamente uma década, reduzir a emissão deste gás pode rapidamente representar reduções nas concentrações globais de GEE (UNEP, 2021; HARRIS, 2023). A título de comparação, enquanto a vida média do CH₄ na atmosfera é de 10 anos, do CO₂ (dióxido de carbono) e do N₂O (óxido nitroso) estão em torno de 100 e 150 anos, respectivamente (IPCC, 2021).

Nos compromissos brasileiros firmados tanto na COP 21 como na COP 26, não são detalhados em quais setores econômicos o país promoverá ações para reduzir as emissões de GEE. Este detalhamento é contemplado nas políticas públicas nacionais, onde são estabelecidas as diretrizes para o desenvolvimento econômico, social e ambiental brasileiro, as quais devem estar alinhadas com os compromissos assumidos internacionalmente. No ano de 2022 foi promulgado o Decreto Federal n. 11.075, que estabelece os procedimentos para a elaboração dos Planos Setoriais de Mitigação das Mudanças Climáticas, e institui o Sistema Nacional de Redução de Emissões de Gases de Efeito Estufa (BRASIL, 2022b; EPE, 2022a).

Para o setor energético em específico, as trajetórias apresentadas no Plano Decenal de Energia (PDE) de 2032 consideram as conjunturas das políticas climáticas e os compromissos internacionais firmados pelo país. Dentre os pontos de destaque, encontram-se: expandir a participação de fontes renováveis na matriz energética; expandir o consumo de biocombustíveis; incentivar a fabricação e o uso de veículos elétricos; promover ganhos de eficiência no setor energético e elétrico; fomentar o aproveitamento energético de resíduos; e reduzir a pegada de carbono para o setor de óleo e gás (EPE, 2022a).

A multidimensionalidade do sistema energético faz com que abordagens disciplinares entre os tópicos do trilema da energia não sejam adequadas, sendo necessário entender as diferentes correlações e seus impactos (PLIOUSIS et al., 2019). Grigoryev e Medzhidova (2021) apontam que esta multidimensionalidade é uma das características que dificultam uma coordenação global para ações de mitigação relacionadas às mudanças do clima e atendimento aos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável. De toda forma, o envolvimento do Brasil e demais países nos compromissos globais para redução das emissões de GEE evidenciam a importância do pilar “ambiental”, nos diversos setores da economia e no trilema da energia. Tais compromissos ressaltam a necessidade da transição energética para uma matriz com tecnologias de baixo carbono para a maioria dos países, de modo ser possível atender às metas estabelecidas.

TRANSIÇÃO ENERGÉTICA E OS DESAFIOS PARA SUA VIABILIZAÇÃO

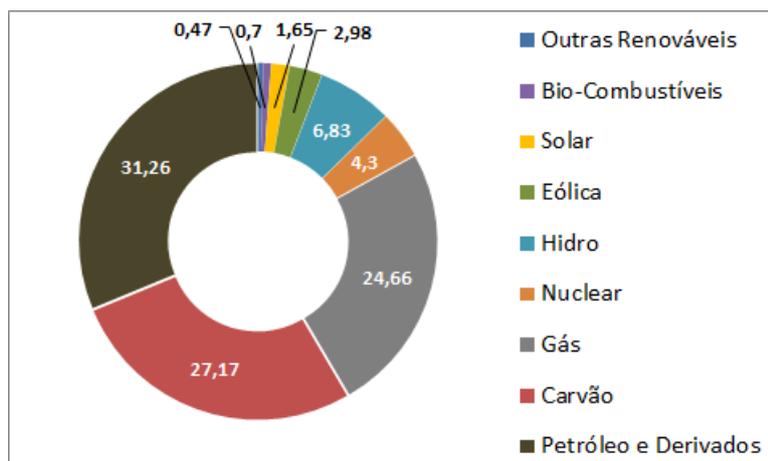
O aumento da preocupação com as questões ambientais na sociedade atual pode ser verificado em vários aspectos da vida cotidiana, seja pela mudança de hábitos individuais, como pela pressão popular exercida sobre o poder público e privado, solicitando a adoção de práticas mais sustentáveis. Aliado a isso, a complexidade do planejamento energético aumenta à medida que a demanda cresce, novas fontes são inseridas na matriz, e a eletrificação atinge maior participação no dia a dia da sociedade (OLIVER e SOVACOOOL, 2017; EPE, 2020).

A transição energética para uma matriz renovável é uma das principais ações mundiais para reduzir as emissões antrópicas de GEE. Além da redução das emissões, esta transição promove também uma quebra de paradigma não apenas no setor energético por inserir novas tecnologias para produção de energia, mas na sociedade como um todo por modificar a relação entre o cidadão-consumidor e a energia. O indivíduo passa a ter um papel mais ativo, contribuindo diretamente para a redução de suas próprias emissões em consequência do amadurecimento e popularização de novas tecnologias, como veículos elétricos para mobilidade urbana e sistemas fotovoltaicos para geração distribuída (GOMES et al., 2021; GODINHO et al., 2023). Além disso, estas novas tecnologias, junto com os avanços no setor de comunicações, estão propiciando o desenvolvimento de cidades mais inteligentes e conectadas. Conforme Lui e Petarnella (2020), transformações tecnológicas alteram a maneira como o cidadão estabelece suas relações com o meio natural e com a sociedade, promovendo uma nova ordem social que busca uma melhoria da qualidade de vida no espaço urbano. Estas cidades inteligentes podem possibilitar o uso de recursos de maneira mais eficiente, contribuindo assim para um melhor equilíbrio do trilema da energia.

Muitos são os fatores conhecidos que podem contribuir para menor confiabilidade de um sistema energético (CALCAGNO, 2023). Uma matriz com maior participação de fontes renováveis (como hídrica, biomassa, solar, eólica) fica mais vulnerável às variações climáticas e ambientais, aumentando a complexidade operacional e reduzindo a segurança energética (YAN, 2022). Por outro lado, esta matriz contribui para menor degradação do meio natural e alterações no clima, colaborando para maior sustentabilidade ambiental. O balanço entre segurança energética e sustentabilidade ambiental, considerando que a energia também precisa ter um preço acessível para todos e que cada país tem suas particularidades, é o desafio enfrentado pelo planejador da expansão do setor (EPE, 2022a).

A queima de combustíveis fósseis é responsável por mais de 89% das emissões mundiais de dióxido de carbono (CO₂) (FRIEDLINGSTEIN et al., 2022; IEA, 2023) e a economia de muitos países é dependente destes combustíveis para prover eletricidade, força motriz, aquecimento e transporte para suas populações, conforme dados extraídos da plataforma *Our World in Data* (2022) e apresentados na Figura 2. Petróleo (e derivados) é o recurso com maior participação no mix energético mundial.

Figura 2 - Matriz Energética Mundial, participação das fontes representada em %



Fonte: Produção dos autores com dados de *Our World in Data* (2022)

Viabilizar a transição energética em grande parte dos países significa fazer mudanças **estruturais, sociais e econômicas**. Para fins de exemplificação, esta transição aborda: compor a oferta de energia com fontes renováveis, descomissionar usinas térmicas que empregam combustíveis fósseis em operação, promover a substituição de combustíveis fósseis por biocombustíveis ou a eletrificação dos meios de transportes e dos processos industriais (IEA, 2022; IRENA, 2022).

A mudança estrutural demandará diversos recursos naturais, já sendo possível perceber o crescimento da demanda por certos minerais críticos¹ e estratégicos, por exemplo, em painéis fotovoltaicos, baterias automotivas, e circuitos eletrônicos, aumentando a preocupação com a degradação ambiental proveniente do aumento da atividade de mineração (BALLINGER et al., 2019; LEE et al., 2020; OWEN et al., 2022).

Já a mudança social demandará alterações nos hábitos individuais de consumo e na forma de vida da sociedade moderna. O consumo energético per capita nos países com economias desenvolvidas é muito superior ao verificado em países com economias emergentes e subdesenvolvidas, o que explicita as diferentes condições sociais de vida de suas populações medida pelo IDH². Para exemplificar, conforme dados extraídos da plataforma *Our World in Data* (2022), o consumo por habitante nos Estados Unidos foi de 78,7 kWh em 2022, enquanto que no Brasil foi de 17,3 kWh, e na Nigéria, de 2,5 kWh.

Por fim, a mudança econômica contempla viabilizar o alto custo financeiro para sustentar esta transformação energética. Segundo dados da IRENA (2022), o investimento mundial médio necessário para garantir o atendimento dos compromissos assumidos no Acordo de Paris é da ordem de 5 trilhões de dólares americanos anuais. Estes altos valores dificultam a adequação da infraestrutura em países com economias mais frágeis e com baixa equidade energética, contribuindo para aprofundar a desigualdade social e para o desequilíbrio do trilema da energia nestes países (BROWN e SPIEGEL, 2019).

¹ Minerais críticos podem ser definidos como aqueles essenciais nas cadeias produtivas de um país e atrelados à suscetibilidade no suprimento, e minerais estratégicos, como aqueles que conferem ao país detentor dos recursos vantagem comercial no mercado global (DE TOMI et al., 2024).

² IDH: Índice de Desenvolvimento Humano é uma unidade de medida utilizada para aferir o grau de desenvolvimento de uma determinada sociedade nos quesitos de educação, saúde e renda.

Idealmente, a política internacional deve proporcionar oportunidades para que países com economias emergentes também tenham condições de transacionar para uma matriz de baixo carbono, apesar da baixa disponibilidade financeira. O desafio de reduzir as emissões de GEE é global, sendo importante que haja uma agenda inclusiva considerando as particularidades de cada nação. É uma oportunidade de reparar injustiças históricas e proporcionar melhores condições de vida para todos (IRENA, 2022; GUPTA et al., 2023).

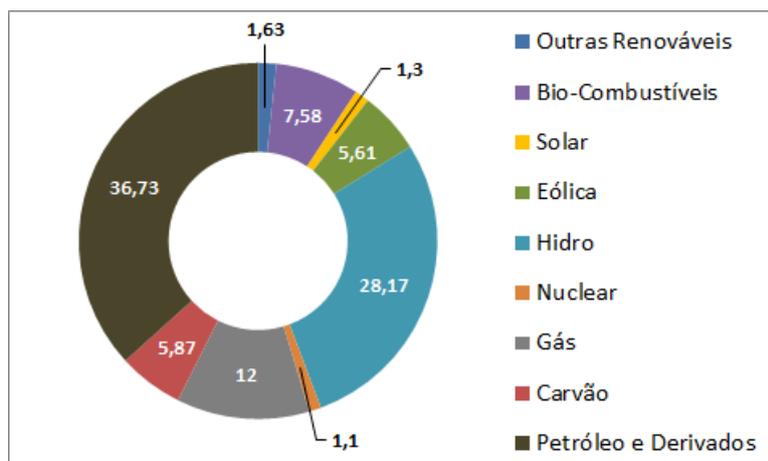
Apesar da transição energética estar na agenda mundial, e vários países terem assumido compromissos para reduzir suas emissões de GEE, a velocidade em que esta transição está acontecendo é incompatível com os objetivos e metas assumidos. Historicamente, transições energéticas são processos lentos devido às mudanças estruturais necessárias para sua viabilização, e será necessário aumentar o ritmo de investimentos atual para adequá-los com a urgência imposta pela atual crise climática e ambiental (IEA, 2022; IRENA, 2022).

BRASIL DIANTE DA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA E TRILEMA DA ENERGIA

No Brasil, os dados do Sistema de Estimativa de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG) mostram que, no ano de 2021, o setor de Energia contribuiu para 18% das emissões totais de GEE nacional. Os maiores responsáveis pelas emissões totais brasileiras foram a Mudança de Uso da Terra e Florestas e o setor Agropecuário com, respectivamente, 49% e 24% do total (SEEG, 2023). Esta situação difere da maioria dos países do mundo, onde o setor energético é o principal responsável pelas emissões de GEE. Conseqüentemente, o atendimento aos compromissos nacionais assumidos com relação à redução das emissões deve considerar ações em todos os setores, e não apenas o energético.

Analisando o setor de energia no país em 2022, contabiliza-se apenas 22% de participação de renováveis no transporte, 62% na indústria, e praticamente 88% na geração de eletricidade (EPE, 2023). Diferentemente do Brasil, muitos países do mundo contam majoritariamente com usinas térmicas a carvão para suprir suas necessidades elétricas. No entanto, conforme é possível perceber comparando as Figuras 2 e 3, assim como na matriz energética mundial, petróleo e derivados também é o recurso com maior participação na matriz energética nacional, evidenciando a necessidade de transição em setores econômicos de uso intensivo de energia não renovável.

Figura 3 - Matriz Energética do Brasil, participação das fontes representada em %



Fonte: Produção dos autores com dados de *Our World in Data* (2022)

Segurança Energética

No caso brasileiro, apesar da transição energética ter uma menor contribuição para a redução das emissões totais de GEE, ainda assim tem um importante papel na diversificação das fontes de energia. Recentes eventos de seca, como nos anos 2001, 2014 e 2021, acarretaram crises hídricas e comprometeram o fornecimento seguro de energia (CUMPLIDO et al., 2023). Aumentar a participação das fontes eólicas e solares na matriz elétrica, reduzindo a dependência da fonte hidráulica, contribui para uma maior segurança energética quando considerada a complementaridade entre as fontes. O crescimento previsto da carga para os anos futuros, de acordo com o apresentado no Plano Decenal de Energia de 2032, demandará a expansão da oferta de energia elétrica, que deve ser feita predominantemente por eólica e solar, aumentando ainda mais a participação destas fontes na matriz (EPE, 2022b).

No setor de transportes, 78% da energia consumida é proveniente de combustíveis fósseis (EPE, 2023). Para viabilizar a transição energética neste setor, são necessários grandes investimentos na eletrificação da frota ou na valorização do uso de biocombustíveis. A tecnologia de produção de etanol, a partir da cana de açúcar, é conhecida e desenvolvida no Brasil desde a década 1970, com a implantação do Programa Nacional do Alcool (Proálcool) (BRASIL, 1975). Esta iniciativa proporcionou a disponibilidade deste biocombustível na maioria dos postos de combustíveis do país, e o crescimento da frota de automóveis adaptada para a combustão tanto de gasolina como de etanol. O uso massivo de biocombustíveis, incluindo para o transporte de cargas, requer maior compreensão com relação aos conflitos e vulnerabilidades provenientes do uso da terra, que podem impactar tanto a segurança energética como a sustentabilidade ambiental. Quanto maior a demanda por biocombustíveis, maior a necessidade de áreas produtivas para produção de biomassa. E, se por um lado, as atividades que acarretam mudança do uso da terra podem proporcionar o aumento de emissões de GEE (MAIA e BOZELI, 2022), por outro, a maior eficiência dessas atividades, incluindo para a produção de energia, podem proporcionar maior sustentabilidade ambiental.

Sustentabilidade Ambiental

Embora a matriz energética apresente quase 50% de renovabilidade, estima-se que o setor de energia no Brasil emitiu em torno de 440 Mt CO_{2eq} em 2021

(SEEG, 2023) e 423 Mt CO_{2eq} em 2022 (EPE, 2023). Comparativamente, a África do Sul, que possui 91% de fontes fósseis em sua matriz energética, teve setorialmente em torno de 447 Mt CO_{2eq} emitidos no ano de 2021 (CT, 2022). Já a Polônia, com 88% de fontes fósseis em sua matriz energética, teve setorialmente em torno de 295 Mt CO_{2eq} emitidos no ano de 2021 (IEA, 2022a). Apesar da matriz energética brasileira ser mais renovável em termos percentuais, os valores absolutos de emissões anuais do setor energético do Brasil são equivalentes aos da África do Sul e superiores aos da Polônia, podendo ser explicado por sua maior população (em torno de 4 vezes maior que da África do Sul e 5 vezes que da Polônia) e maior dimensão territorial do país (quase 7 vezes maior que a África do Sul e mais que 25 vezes a Polônia) (DESA, 2022; IBGE, 2023).

Conforme já apresentado, para viabilizar a transição energética são necessárias adequações estruturais, e é importante observar que instaurações de determinados empreendimentos podem causar impactos ambientais e sociais. No setor elétrico, por exemplo, a implantação de grandes parques de geração renovável (hidrelétricas, eólica e solar), apesar de não emitirem GEE durante o processo de conversão da energia primária para energia elétrica, podem contribuir tanto para degradação ambiental como para a piora dos indicadores sociais das populações que habitam o entorno destes empreendimentos. Os impactos finais socioambientais do ciclo de vida completo, tanto das tecnologias solar quanto eólica, ainda não foram suficientemente avaliados e não se tem a dimensão exata de sua importância (MARQUES et al., 2021).

No Brasil, parte desta preocupação é contemplada no PDE 2032, no qual afirma que, para uma expansão energética sustentável, é necessário enfrentar três desafios socioambientais estratégicos, sendo eles: compatibilização da produção, geração e transmissão de energia com a conservação da biodiversidade; com outros usos da água; e mitigação e adaptação às mudanças climáticas. Além disso, as soluções para estes temas passam por soluções conjuntas entre o setor de energia e de meio ambiente, gestão entre os setores impactados pelos usos múltiplos da água, e desenvolvimento de novas tecnologias que permitam fazer a transição energética para uma matriz elétrica ainda mais renovável (EPE, 2022a).

Equidade Energética

No que diz respeito à equidade energética, o Brasil assume o 67º lugar no *ranking* do Índice do Trilema da Energia (Tabela 1), muito além das posições que assume nos demais temas (12º em segurança energética e 8º em sustentabilidade ambiental). O mau desempenho nesse terceiro pilar do trilema pode ser ilustrado pelas condições escassas e precárias de acesso à energia elétrica na Amazônia, ou mesmo a falta de acesso por quase 1 milhão de pessoas na região (IEMA, 2020; SCHUTZE et al, 2022). Para os 3,1 milhões de habitantes na região amazônica que possuem acesso à eletricidade por meio dos chamados sistemas isolados, predomina-se a geração por usinas térmicas a diesel, um combustível poluente e caro que, ao custo do combustível em si, somam-se subsídios e uma difícil logística de abastecimento (EPE, 2022c).

Além do limitado acesso e elevado custo da eletricidade para parte da população no país, os preços do combustível para veículos também é limitante para a equidade, uma vez que o país é importador de parte do diesel e da gasolina que consome (EPE, 2023) e fica vulnerável à volatilidade de preços dos mercados internacionais. Todos esses fatores combinados (custos, logística, emissões)

comprometem não apenas a equidade energética, como também a segurança energética e a sustentabilidade ambiental.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A crise climática é um dos principais catalisadores para que as considerações com a preservação do meio natural tenham crescido continuamente. O assunto tem sido tratado pelas lideranças globais com a afirmação de uma série de compromissos nacionais de modo a promover um mundo ambientalmente mais equilibrado nos anos futuros. O aumento da prioridade com a preservação ambiental proporciona um novo ponto de equilíbrio para o trilema da energia, que deve ser considerado por cada país ao fazer o seu planejamento energético. A transição energética para uma matriz renovável terá que promover uma completa e complexa reorganização energética, da geração ao consumo e, além de estar adequada com práticas ambientais sustentáveis, precisará prover energia segura a um preço justo.

Neste novo cenário tecnológico de busca pelo uso mais eficiente dos recursos naturais, o consumo mais consciente de bens e produtos contribui para uma sociedade mais sustentável e também para melhor equilíbrio do trilema da energia. Estes avanços tecnológicos podem possibilitar o desenvolvimento de cidades inteligentes e conectadas, onde diminui-se a ociosidade da infraestrutura e o desperdício de recursos.

Apesar da redução da concentração dos GEE ser uma meta global, o custo financeiro para promover uma transição energética limpa não é factível para alguns países. O aspecto econômico continua sendo um importante requisito para estabelecer estratégias para mitigação dos impactos negativos antrópicos no sistema terrestre. Nações com economias emergentes, e dependentes das fontes fósseis, precisam de auxílio internacional para adequar as suas matrizes a práticas sustentáveis. E, se bem aplicados, esses auxílios podem ajudar a reparar injustiças históricas e colaborar para melhoria da qualidade de vida das populações destes países.

Analisando especificamente o caso brasileiro, é possível entender a complexidade necessária para viabilizar a transição energética de um país. Mesmo no Brasil, que já possui uma matriz energética com grande participação de fontes renováveis, e com contribuição inferior a 20% para emissões totais de GEE, são vários os desafios. Esta transição é importante para reduzir as emissões absolutas e promover a diversificação da matriz nacional, contribuindo para maior **segurança energética** através da complementaridade entre as fontes. Consequentemente, evita-se o despacho de usinas termelétricas fósseis poluentes e caras, contribuindo também para **sustentabilidade ambiental** e **equidade energética**. Para contínua redução das emissões do setor energético nacional é preciso investir recursos também no lado do consumo, tanto eletrificando cadeias produtivas ou migrando para o uso de biocombustíveis. A inserção de novas tecnologias aliada a políticas públicas adequadas, podem promover mudanças nos hábitos de consumo da população, e são ferramentas fundamentais para um melhor equilíbrio do trilema da energia nacional.

Apesar das metas assumidas pelo Brasil nas COP's nos anos de 2015 e 2021, somente no ano de 2022 foi assinado o Decreto Federal que estabelece os

procedimentos para a elaboração dos Planos Setoriais de Mitigação das Mudanças Climáticas, que determinará as ações direcionadas aos setores produtivos onde reduções das emissões serão efetuadas. Assim como o Brasil, as ações de diversos outros países também não estão alinhadas com as metas e prazos assumidos, e nem com a urgência ambiental atual.

O momento desta discussão é importante, ainda mais considerando que o Brasil sediará dois eventos mundiais relevantes e de grande repercussão. Tanto na reunião do G-20 em novembro de 2024, como na COP 30 em novembro de 2025, o país terá a oportunidade de contribuir efetivamente com as discussões sobre a transição energética mundial. Nas reuniões preparatórias, o Brasil já se manifestou reforçando os desafios da transição energética dos países emergentes, bem como propôs a criação de uma coalizão global para apoiar as políticas e planejamento energético desses países (BRASIL, 2024)

Buscar por uma solução justa global é uma tarefa complexa, o que dificulta a transição energética na velocidade necessária. Entender e considerar essas complexidades nas relações do trilema de energia em cada país é essencial para uma transição ambientalmente sustentável, energeticamente segura e equitativa.

Energy trilemma: A global environmental change approach for Brazil and the World

ABSTRACT

The trilemma characterizes the correlations among energy security, energy equity and environmental sustainability. Due to the growing awareness of global environmental changes, environmental concerns have increased, creating a new balance point for the trilemma. Such context has pressured the energy transition, although the actions of many nations still need to match the current environmental urgency. Based on a literature review, this paper presents a characterization of the energy trilemma to understand how global environmental changes have impacted it, both from an international perspective and the Brazilian case. It is possible to conclude that the relationships among the themes of the energy trilemma are complex and must be balanced, reflecting the local features and needs of each region or country, and a global or unique solution for this balance is not possible.

KEYWORDS: Energy Transition. Energy Planning. Energy Security. Energy Equity. Environmental Sustainability.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Os autores também agradecem ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia para Mudanças Climáticas Fase 2 (INCT-MC), através dos processos CNPq 573797/2008-0 e FAPESP 2014/50848-9.

REFERÊNCIAS

ALVES, J. E. D. **Trilema Energético**. EcoDebate, 2015. Disponível em: <<https://ecossocioambiental.org.br/2015/12/11/trilema-energetico/>>.

ARES, E. **COP26: the international climate change conference**, Glasgow, UK. House of Commons Library, n. October, p. 1–21, 2021.

ARRHENIUS, Svante. XXXI. **On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground**. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, v. 41, n. 251, p. 237-276, 1896.

BALLINGER, B.; STRINGER, M.; SCHMEDA-LOPEZ, D. R.; KEFFORD, B.; PARKINSON, B.; GREIG, C.; SMART, S. **The vulnerability of electric vehicle deployment to critical mineral supply**. Applied Energy, v. 255, 2019.

BRASIL. **Decreto Legislativo 76.593** de 14 de novembro de 1975. 1975. Disponível em: <<https://www2.camara.leg.br/legin/fed/decret/1970-1979/decreto-76593-14-novembro-1975-425253-publicacaooriginal-1-pe.html>>

BRASIL. **BRAZIL NATIONALLY DETERMINED CONTRIBUTION**. Paris Agreement, v. 33, n. 1, p. 1–12, 2022a.

BRASIL. **Decreto Nacional no 11.075**, de 19 de maio de 2022. p. 19–22, 2022b.

BRASIL. GT de Transições Energéticas em BH é concluído e define combate à pobreza energética no mundo como grande objetivo. 2024. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/g20-gt-de-transicoes-energeticas-em-bh-e-concluido-e-define-combate-a-pobreza-energetica-no-mundo-como-grande-objetivo>> Acesso em 10/07/2024.

BROWN, B.; SPIEGEL, S. J. **Coal, climate justice, and the cultural politics of energy transition**. Global Environmental Politics, v. 19, n. 2, 2019.

CALCAGNO, D. L.; CANTOS CORNEJO, M. L.; BAZIUK, P. A. **Análisis de vulnerabilidades e interrupciones del Sistema Argentino de Interconexión**. Rev. Tecnol. Soc., Curitiba, v. 19, n. 56, p.51-71, abr./jun., 2023. Disponível em: <https://periodicos.utfpr.edu.br/rts/article/view/15918>. Acesso em: 06/07/2024.

CASTREE, N. **Speaking for the ‘people disciplines’: Global change science and its human dimensions**. Anthropocene Review, v. 4, n. 3, p. 160–182, 2017.

CT. **South Africa Climate Transparency Report: Comparing G20 Climate Action.** Climate Transparency (CT), 2022. Disponível em: <<https://www.climate-transparency.org/wp-content/uploads/2022/10/CT2022-South-Africa-Web.pdf#page=8%20blank>>

CUMPLIDO, M. A.; INOCENTE, M. C.; MEDEIROS, T. P.; SAMPAIO, G.; MARENGO, J. A. Secas e crises hídricas no Sudeste do Brasil: um histórico comparativo entre os eventos de 2001, 2014 e 2021 com enfoque na bacia do rio Paraná. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 32, n. 19, p. 129–153, 2023. <https://doi.org/10.55761/abclima.v32i19.16154>

DE TOMI, G.; LOREDO, G.; SANTOS, V. **Minerais Críticos e Estratégicos no Brasil: Uma Agenda de Soberania e de Clima.** Brasília. Centro Soberania e Clima. 24p, 2024.

DEMARIA, F. **Why economic growth is not compatible with environmental sustainability.** Disponível em: <<https://theecologist.org/2018/feb/22/why-economic-growth-not-compatible-environmental-sustainability>>. Acesso em: 4 abr. 2023.

DESA. **2021 Demographic Yearbook 72nd Issue - Table 3. Population by sex, annual rate of population change, surface area and density.** DEPARTAMENTO DE ASSUNTOS ECONÔMICOS E SOCIAIS DAS NAÇÕES UNIDAS (DESA). New York: ONU, 2022. Disponível em: <<https://unstats.un.org/unsd/demographic-social/products/dyb/dybsets/2021.pdf>>

EPE. **Plano Nacional de Energia - PNE 2050.** Ministério de Minas e Energia - MME 2020.

EPE. **Nota Técnica: Energia e Meio Ambiente - PDE 2032.** Plano Decenal de Energia 2032, p. 1–24, 2022a.

EPE. **Requisitos de Energia e Potência - PDE2032.** Plano Decenal de Energia 2032, 2022b.

EPE. **Planejamento do atendimento aos Sistemas Isolados - Horizonte 2023-2027 - Ciclo 2022.** Nº EPE-DEE-NT-102/2022-r0. Ministério de Minas e Energia - MME, 2022c.

EPE. **Balanco Energético Nacional - BEN2023.** Ministério de Minas e Energia - MME, 2023

FREY, J.; BURGESS, J. **Why do climate change negotiations stall? Scientific evidence and solutions for some structural problems,** Global Discourse, 2022, Disponível em: <<https://doi.org/10.1332/204378921X16431423735159>>

FRIEDLINGSTEIN, P.; O’SULLIVAN, M.; JONES, M. W.; ANDREW, R. M.; GREGOR, L.; HAUCK, J.; LE QUÉRÉ, C.; LUIJKX, I. T.; OLSEN, A.; PETERS, G. P.; PETERS, W.; PONGRATZ, J.; SCHWINGSHACKL, C.; SITCH, S.; CANADELL, J. G.; CIAIS, P.; JACKSON, R. B.; ALIN, S. R.; ALKAMA, R.; ARNETH, A.; ARORA, V. K.; BATES, N. R.; BECKER, M.; BELLOUIN, N.; BITTIG, H. C.; BOPP, L.; CHEVALLIER, F.; CHINI, L. P.; CRONIN, M.; EVANS, W.; FALK, S.; FEELY, R. A.; GASSER, T.; GEHLEN, M.; GKRTZALIS, T.; GLOEGER,

L.; GRASSI, G.; GRUBER, N.; GÜRSES, Ö.; HARRIS, I.; HEFNER, M.; HOUGHTON, R. A.; HURTT, G. C.; IIDA, Y.; ILYINA, T.; JAIN, A. K.; JERSILD, A.; KADONO, K.; KATO, E.; KENNEDY, D.; et al. **Global Carbon Budget 2022**. Earth System Science Data, v. 14, n. 11, p. 4811–4900, 2022.

GALTUNG, J. **Violence, peace, and peace research**. Journal of Peace Research, v. 6, n. 3, 1969.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. **Energia, Meio Ambiente e Desenvolvimento**. Editora USP, 2012. Disponível em: <<https://www.edusp.com.br/livros/energia-meio-ambiente-e-desenvolvimento/>> Acesso em 04/09/2023

GODINHO, E. Z.; CANEPPELE, F. de L.; FRIGO, M. M. et al. Benefícios da energia solar associados a emissão de dióxido de carbono na matriz elétrica brasileira. Rev. Tecnol. Soc., Curitiba, v. 19, n. 58, p. 245-258, out./dez., 2023. Disponível em: <https://periodicos.utfpr.edu.br/rts/article/view/16496> Acesso em: 06/07/2024. GOMES, A.L.C.; SCHIAVI, M.T.; COSTA, L.S.F. Carro elétrico e a comunicação pública da ciência. Rev. Tecnol. Soc., Curitiba, v. 17, n. 48, p. , jul./set., 2021. Disponível em: <https://periodicos.utfpr.edu.br/rts/article/view/12671>. Acesso em: 06/07/2024

GRIGORYEV, L. M.; MEDZHIDOVA, D. D. **Global energy trilemma**. Russian Journal of Economics, v. 6, n. 4, p. 437–462, 2021.

GUPTA, J.; LIVERMAN, D.; PRODANI, K.; ALDUNCE, P.; BAI, X.; BROADGATE, W.; CIOBANU, D.; GIFFORD, L.; GORDON, C.; HURLBERT, M.; INOUE, C. Y. A.; JACOBSON, L.; KANIE, N.; LADE, S. J.; LENTON, T. M.; OBUURA, D.; OKEREKE, C.; OTTO, I. M.; PEREIRA, L.; ROCKSTRÖM, J.; SCHOLTENS, J.; ROCHA, J.; STEWART-KOSTER, B.; DAVID TÀBARA, J.; RAMMELT, C.; VERBURG, P. H. **Earth system justice needed to identify and live within Earth system boundaries**. Nature Sustainability, 2023.

HALL, C. A. S. **The 50th Anniversary of The Limits to Growth: Does It Have Relevance for Today's Energy Issues?** Energies, v. 15, n. 14, 2022.

HARRIS, M. **Could a single methane moonshot outpace a thousand carbon cuts?** Disponível em: <<https://www.anthropocenemagazine.org/2023/03/could-a-single-methane-moonshot-outpace-a-thousand-carbon-cuts/>>. Acesso em: 12 abr. 2023.

HERRINGTON, G. **Update to limits to growth: Comparing the World3 model with empirical data**. Journal of Industrial Ecology, v. 25, n. 3, 2021.

IBGE. **Censo Demográfico 2022**. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Junho, 2023. Disponível em: <<https://censo2022.ibge.gov.br/panorama/>>. Acesso em: 06/09/2023.

IEA. **World Energy Outlook 2022**. International Energy Agency (IEA), 2022. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>>

IEA. **Poland 2022**. International Energy Agency (IEA), 2022a. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/poland-2022>>

IEA. **CO2 Emissions in 2023**, International Energy Agency (IEA), 2023. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2022>>

IEMA. **Exclusão Elétrica na Amazônia Legal: quem ainda está sem acesso à energia elétrica?**. Instituto de Energia e Meio Ambiente, 2020.

IPBES. **Global Assessment Report of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity**. [s.l.: s.n.]. 1148 p. ISBN(9783947851201), 2015.

IPBES. **Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services**. International Institute for Sustainable Development, p. 1–65, 2022.

IPCC. Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2021: The Physical Science Basis**. 2021. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>>.

IPCC. Sixth Assessment Report of Intergovernmental Panel on Climate Change. **Impacts, Adaptation and Vulnerability**. 2022. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>>.

IRENA. **World energy transitions outlook 2022**. World Energy Transitions, p. 1–54, 2022.

KANG, H. **An Analysis of the Relationship between Energy Trilemma and Economic Growth**. Sustainability (Switzerland), v. 14, n. 7, 2022.

KHAN, I.; HOU, F.; IRFAN, M.; ZAKARI, A.; LE, H. P. **Does energy trilemma a driver of economic growth? The roles of energy use, population growth, and financial development**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 146, n. May, p. 111157, 2021.

LE, T. H.; NGUYEN, C. P. **Is energy security a driver for economic growth? Evidence from a global sample**. Energy Policy, v. 129, p. 436–451, 1 jun. 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.02.038>>.

LEE, J.; BAZILIAN, M.; B. SOVACOOOL, B.; HUND, K.; JOWITT, S. M.; NGUYEN, T. P.; MÄNBERGER, A.; KAH, M.; GREENE, S.; GALEAZZI, C., AWUAH-OFFEI, K.; MOATS, M.; TILTON, J.; KUKODA, S. **Reviewing the material and metal security of low-carbon energy transitions**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 124, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109789>>.

LUI, M. L. C.; PETARNELLA, L. As cidades inteligentes e os desafios para a implantação da garantia da qualidade de serviços. Rev. Tecnol. Soc., Curitiba, v. 16, n. 39, p. 182-198, jan/mar. 2020. Disponível em: <https://periodicos.utfrpr.edu.br/rts/article/view/9586>. Acesso em: 06/07/2024.

LUTZENHISER, L.; STERN, P. C.; YOUNG, O. R.; DRUCKMAN, D. **Global Environmental Change: Understanding the Human Dimensions**. Contemporary Sociology, v. 21, n. 4, p. 487, 1992.

MAIA, R.; BOZELLI, H. **The importance of GHG emissions from land use change for biofuels in Brazil: An assessment for current and 2030 scenarios**. Resources,

Conservation and Recycling, Volume 179, 2022, ISSN 0921-3449. Disponível em:
<<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.106131>>

MANNION, A. M. **Global environmental change: A natural and cultural environmental history**. [s.l.: s.n.]. 1–387 p. ISBN (9781315842615).

MARQUES, J.; BARRETO, A.; BARRERO, F.; MAIA, I. **O Cárcere dos Ventos**. [s.l.: s.n.]. ISBN(9786557320389).

MEADOW, D. H.; MEADOW, D. I.; RANDERS, J.; BEHRENS, W. W. **The Limits to Growth**. The Club of Rome, p. 1–9, 1972.

MURPHY, T. W.; MURPHY, D. J.; LOVE, T. F.; LEHEW, M. L. A.; MCCALL, B. J. **Modernity is incompatible with planetary limits: Developing a PLAN for the future**. Energy Research and Social Science 2021.

NILSSON, M.; GRIGGS, D.; VISBECK, M. **Policy: Map the interactions between Sustainable Development Goals**. Nature 534, 320–322, 2016. Disponível em
<<https://doi.org/10.1038/534320a>>

PRADHAN, P.; COSTA, L.; RYBSKI, D.; LUCHT, W.; KROPP, J. **A Systematic Study of Sustainable Development Goal (SDG) Interactions**. AGU, 2017. Disponível em:
<<https://doi.org/10.1002/2017EF000632>>

OLIVEIRA, A.; CALIL, R.; ALMEIDA, M.F.; SOUSA, M. **A Systemic and Contextual Framework to Define a Country's 2030 Agenda from a Foresight Perspective**. Sustainability 2019, 11, 6360 Disponível em:
<<https://doi.org/10.3390/su11226360>>

OLIVER, J.; SOVACOOOL, B. **The Energy Trilemma and the Smart Grid: Implications Beyond the United States**. Asia and the Pacific Policy Studies, v. 4, n. 1, 2017.

ONU. **Charter of United Nations**. 1945.

ONU. **United Nations Framework Convention**. v. 62220, 1992.

ONU. **The Paris Agreement**. COP15, p. 24–45, 2015.

ONU. **Agenda 2030. Objetivos do Desenvolvimento Sustentável**, v. 14, n. 2, p. 72, 2015.

OWEN, J. R.; KEMP, D.; LECHNER, A. M.; HARRIS, J.; ZHANG, R.; LÈBRE, É. **Energy transition minerals and their intersection with land-connected peoples**. Nat Sustain, v. 6, p. 203-211, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/s41893-022-00994-6>>

PERSSON, L.; CARNEY ALMROTH, B. M.; COLLINS, C. D.; CORNELL, S.; DE WIT, C. A.; DIAMOND, M. L.; FANTKE, P.; HASSELLÖV, M.; MACLEOD, M.; RYBERG, M. W.; SØGAARD JØRGENSEN, P.; VILLARRUBIA-GÓMEZ, P.; WANG, Z.; HAUSCHILD, M. Z. **Outside the Safe Operating Space of the Planetary Boundary for Novel Entities**. Environmental Science and Technology, v. 56, n. 3, 2022.

PLIOUSIS, A.; ANDRIOSOPOULOS, K.; DOUMPOS, M.; GALARIOTIS, E. A **Multicriteria Assessment Approach to the Energy Trilemma**. The Energy Journal, v. 40, n. 01, 2019.

ROCKSTRÖM, J.; STEFFEN, W.; NOONE, K.; PERSSON, Å.; CHAPIN, F. S.; LAMBIN, E. F.; LENTON, T. M.; SCHEFFER, M.; FOLKE, C.; SCHELLNHUBER, H. J.; NYKVIST, B.; DE WIT, C. A.; HUGHES, T.; VAN DER LEEUW, S.; RODHE, H.; SÖRLIN, S.; SNYDER, P. K.; COSTANZA, R.; SVEDIN, U.; FALKENMARK, M.; KARLBERG, L.; CORELL, R. W.; FABRY, V. J.; HANSEN, J.; WALKER, B.; LIVERMAN, D.; RICHARDSON, K.; CRUTZEN, P.; FOLEY, J. A. **A safe operating space for humanity**. Nature 2009.

RODRICK, **The Inescapable Trilemma of the world economy**. D. Dani Rodrik Weblog, 2007. Disponível em: <https://rodrik.typepad.com/dani_rodriks_weblog/2007/06/the-inescapable.html>

SCHUTZE, A.; BINES, L.; ASSUNÇÃO, J. **Rios de Diesel na Amazônia Legal: Por que a Região com as Maiores Hidrelétricas do País Depende de Combustível Caro e Poluente?** Rio de Janeiro: Climate Policy Initiative (CPI), 2022.

SEEG – Sistema de Estimativa de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa. **Análise das emissões brasileiras de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil – 1970-2021**. Observatório do Clima. Disponível em: <<https://seeg.eco.br>>. Acesso em 26/06/2023

SERGL, M. J.; CUNHA, G. A relação entre o indivíduo pós-moderno, o consumo e a internet das coisas. Rev. Tecnol. Soc., Curitiba, v. 16, n. 39, p. 41-56, jan/mar. 2020. Disponível em: <https://periodicos.utfpr.edu.br/rts/article/view/8747>. Acesso em: 06/07/2024.

STEFFEN, W.; RICHARDSON, K.; ROCKSTRÖM, J.; CORNELL, S. E.; FETZER, I.; BENNETT, E. M.; BIGGS, R.; CARPENTER, S. R.; DE VRIES, W.; DE WIT, C. A.; FOLKE, C.; GERTEN, D.; HEINKE, J.; MACE, G. M.; PERSSON, L. M.; RAMANATHAN, V.; REYERS, B.; SÖRLIN, S. **Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet**. Science, v. 347, n. 6223, 2015.

THOMSON, E. **6 ways Russia's invasion of Ukraine has reshaped the energy world**. Disponível em: <<https://www.weforum.org/agenda/2022/11/russia-ukraine-invasion-global-energy-crisis/>>.

TURNER, G. M. **A comparison of The Limits to Growth with 30 years of reality**. Global Environmental Change, v. 18, n. 3, 2008.

ULLAH, S.; KHAN, M.; YOON, S. M. **Measuring energy poverty and its impact on economic growth in Pakistan**. Sustainability (Switzerland), v. 13, n. 19, 2021.

UNEP. **Global Methane Assessment** (full report). [s.l: s.n.]. 1–173 p. ISBN(9789280738544).

VIEIRA, M. **Framing the fragmentation of peace: an analysis of the UN Sustainable Development Goals (SDGs)**. Journal of Global Studies, n. 1973, p. 18, 2020.

WCED. **Our Common Future. World Commission on Environment and Development**, v. 17, n. Chapter 7, p. 1–91, 1987.

WEC. **World Energy Trilemma Index 2022**. World Energy Council and Olyver Wyman, p. 1–69, 2022.

YAN, J. **Energy transition: Time matters**. Advances in Applied Energy 2022.

Recebido: 21/10/2023

Aprovado: 26/07/2024

DOI: 10.3895/rts.v20n61.17666

Como citar:

POYER, Felipe Husadel; CUMPLIDO, Meiriele Alvarenga; GONÇALVES, André Rodrigues et al. Trilema da Energia: uma perspectiva no contexto das mudanças ambientais globais. **Tecnol. Soc.**, Curitiba, v. 20, n. 61, p. 269-291, jul./set., 2024. Disponível em:

<https://periodicos.utfpr.edu.br/rts/article/view/17666>

Acesso em: XXX.

Correspondência:

Direito autoral: Este artigo está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.

