

# Relevant Aspects of Energy Sources in the Energy Transition to Achieve Net-Zero

Bruno Ecker Pizani, André Luiz Veiga Gimenes, Miguel Edgar Morales Udaeta, Vanessa Meloni Massara e Viviane Tavares Nascimento, *GEPEA/EPUSP*

**Abstract**—This paper aims to analyze the energy transition towards Net-Zero, exploring how different energy sources can contribute to achieving carbon neutrality by 2050. The study seeks to explain the concept of Net-Zero, relating it to carbon emissions, to balance the levels present in the atmosphere. Subsequently, the current panorama of carbon emissions is analyzed, identifying challenges to reverse this scenario, and a specific case study of Brazil is presented. Strategies to reduce emissions in the Brazilian energy sector are discussed, aiming for sustainable development and alignment with global commitments to mitigate climate change.

**Index Terms**—Energy Transition, Net-Zero, Carbon Neutrality, Renewable Energy, Brazilian Energy Sector.

## I. INTRODUÇÃO

A dependência histórica de combustíveis fósseis aumentou significativamente a emissão de gases de efeito estufa (GEEs), tornando a transição energética para uma matriz “mais verde” uma necessidade imperativa diante dos desafios ambientais atuais. A busca pelo equilíbrio entre a quantidade de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) emitida na atmosfera e a quantidade removida dela (Net-Zero de emissões de carbono) representa uma resposta urgente e inadiável aos desafios climáticos enfrentados pela humanidade. Este conceito complexo vai além da mera substituição de fontes de energia, abrangendo uma mudança de paradigma em toda a cadeia de sistemas energéticos [1, 2].

Embora o mundo já esteja familiarizado com processos de transição energética, o período atual distingue-se dos anteriores por seu objetivo principal. Enquanto as transições anteriores estavam vinculadas ao desenvolvimento econômico ou à segurança energética, a fase atual é impulsionada principalmente pela preocupação ambiental e pela redução de emissões de carbono, em resposta à crescente crise climática global [3].

A crescente preocupação com o aquecimento global e suas consequências têm levado a uma busca incessante por soluções que possam mitigar os efeitos das mudanças climáticas [4]. Tratados internacionais como o Protocolo de Montreal, que visa proteger a camada de ozônio, o Protocolo de Kyoto, o primeiro

tratado a controlar a emissão de GEEs, e o Acordo de Paris, que rege medidas de redução de dióxido de carbono a partir de 2020, ilustram a crescente cooperação internacional para enfrentar essas questões. No Acordo de Paris, os países participantes concordaram em limitar o aquecimento global a 1,5°C, reduzindo as emissões de dióxido de carbono a partir de 2020, evidenciando o compromisso global com a mitigação da mudança climática [5].

A compreensão e a implementação dessas mudanças são cruciais não apenas para a mitigação das mudanças climáticas, mas também para assegurar um futuro sustentável para as próximas gerações. Este estudo pretende contribuir com análises e estratégias que possam guiar a transição energética do Brasil rumo a uma matriz energética mais limpa e sustentável. O trabalho busca avaliar, visando o Net-Zero, como cada fonte de energia poderá contribuir para o desenvolvimento limpo da matriz energética brasileira. Inicialmente será explicado o conceito de Net-Zero. Na sequência, serão apresentados o panorama energético atual e o papel das fontes de energia, comparando o cenário de emissões atual com o cenário futuro considerando maior inserção das fontes renováveis. Por fim, será abordado um estudo de caso, discutindo o que o Brasil precisa fazer para reduzir suas emissões no setor de energia.

## II. O CONCEITO DE NET-ZERO

O conceito de Net-Zero refere-se ao equilíbrio entre as emissões de GEEs, principalmente CO<sub>2</sub>, e a remoção dessas emissões da atmosfera. Em outras palavras, atingir a neutralidade de carbono significa que qualquer emissão de CO<sub>2</sub> remanescente deve ser compensada por ações que removam uma quantidade equivalente da atmosfera, resultando em uma emissão líquida de carbono igual a zero [6, 7].

Existem duas fontes antropogênicas de dióxido de carbono: emissões de combustíveis fósseis e emissões líquidas (incluindo remoções) resultantes da mudança no uso da terra e gestão da terra. As emissões de CO<sub>2</sub> de origem fóssil incluem a combustão dos combustíveis fósseis carvão, óleo e gás, abrangendo todos os setores da economia (eletricidade, transporte, industrial e construção), carbonatos fósseis como na

---

B. E. Pizani trabalha na Delta Energia, São Paulo, SP, Brasil (e-mail: eng.brunoecker@gmail.com).

A. L. V. Gimenes trabalha na Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil (e-mail: gimenes@gmail.com).

M. E. M. Udaeta trabalha na Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil (e-mail: udaeta@pea.usp.br).

V. M. Massara trabalha na Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil (e-mail: vanessa.massara@gmail.com).

V. T. Nascimento trabalha na Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil (e-mail: viviane.tav.nascimento@gmail.com).

fabricação de cimento, e outros processos industriais como a produção de produtos químicos e fertilizantes [7]. A Fig. 1 apresenta o crescimento das emissões de carbono causadas pelo homem a partir do início da era industrial.

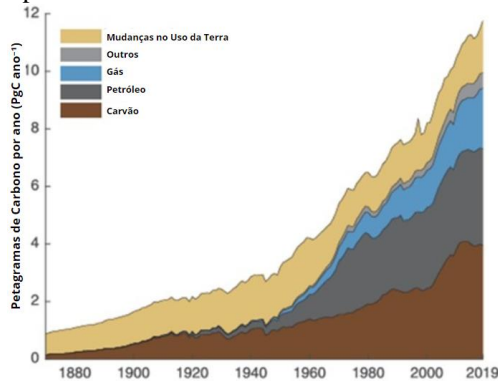


Fig. 1. Crescimento das emissões antropogênicas de carbono a partir da era industrial. Fonte: [7].

Essa quantidade de carbono presente na atmosfera pode ser equilibrada de duas formas. A primeira é a redução das emissões, que implica na diminuição significativa das emissões de carbono em todas as atividades econômicas e sociais. Isso pode incluir a transição para fontes de energia renováveis, a melhoria da eficiência energética, e a adoção de tecnologias limpas em setores como transporte, indústria e agricultura. A segunda é a remoção direta de carbono da atmosfera, através de soluções baseadas na natureza, como reflorestamento, recuperação de ecossistemas, e manejo sustentável de solos agrícolas, ou através de tecnologias de captura e armazenamento de carbono, que capturam o gás das fontes de emissão e o armazenam em locais geológicos subterrâneos. Há também tecnologias de captura direta de ar, que removem CO<sub>2</sub> diretamente do ar ambiente [1, 4, 6]. A Fig. 2 ilustra os principais processos dentro do ciclo global do carbono, relacionando-os com diferentes escalas de tempo.

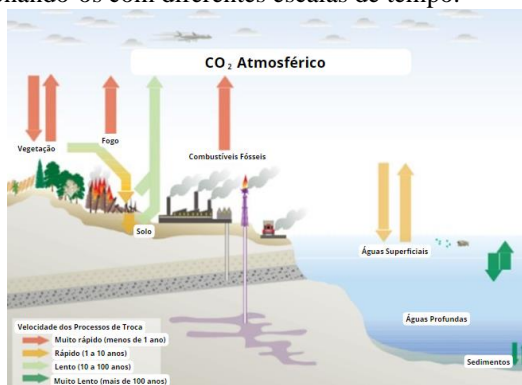


Fig. 2. Processos que envolvem os ciclos de carbono. Fonte: [6].

Os atuais fluxos de carbono antropogênicos na atmosfera não estão em equilíbrio: as emissões provenientes de combustíveis fósseis, processos industriais e mudanças no uso da terra excedem em muito a remoção de carbono nos sumidouros relacionados ao uso da terra. O zero líquido requer que os fluxos antropogênicos se equilibrem de forma agregada.

Isso exige uma redução radical nas emissões de carbono relacionadas a combustíveis fósseis e uso da terra, bem como um aumento nos sumidouros geológicos e biológicos. Um estado de zero líquido duradouro reconhece ainda que o armazenamento biológico é limitado em capacidade e mais efêmero do que o armazenamento geológico. Portanto, esse estado requer que os fluxos antropogênicos líquidos para e de cada esfera (não apenas a atmosfera) sejam iguais a zero [4].

Atingir a neutralidade de emissões de carbono é crucial para limitar o aquecimento global e mitigar os impactos das mudanças climáticas. O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) indica que, para limitar o aquecimento global a 1,5°C acima dos níveis pré-industriais, as emissões globais de CO<sub>2</sub> devem atingir o Net-Zero por volta de 2050. Trata-se de um objetivo ambicioso, mas necessário, para enfrentar as mudanças climáticas e garantir um futuro sustentável. Atingi-lo requer esforços coordenados de governos, empresas e indivíduos. Se as emissões líquidas de CO<sub>2</sub> não se tornarem negativas (ou seja, removendo mais dióxido de carbono do que emitindo), o aquecimento causado pelo gás na superfície continuará alto por muitas décadas a séculos. Isso ocorre porque o processo de absorção de CO<sub>2</sub> pelos oceanos, que leva entre 40 e 200 anos, é limitado pela capacidade térmica dos mesmos. Com o aumento da concentração de CO<sub>2</sub>, os oceanos não só absorvem mais carbono, mas também aquecem, o que diminui sua eficiência de captura de dióxido de carbono. Esse equilíbrio térmico impede uma redução rápida do aquecimento global, prolongando seus efeitos.

### III. PANORAMA ENERGÉTICO ATUAL

As emissões globais de CO<sub>2</sub> relacionadas a energia aumentaram 1,1% em 2023, atingindo um novo recorde de 37,4 Gt. Este aumento de 410 milhões de toneladas (Mt CO<sub>2</sub>) representa um desafio significativo para as metas climáticas estabelecidas no Acordo de Paris, que exige uma redução rápida e substancial das emissões de CO<sub>2</sub> para limitar o aquecimento global a 1,5°C acima dos níveis pré-industriais. Compreender os fatores por trás desse crescimento é essencial para avaliar o progresso e as perspectivas da transição energética global [8].

A taxa de crescimento das emissões de CO<sub>2</sub> ao longo da última década foi de 0,5% ao ano, chegando a níveis parecidos com os registrados nas décadas de 1970 e 1980. Naquelas décadas, o mundo experimentou grandes perturbações devido aos choques energéticos de 1973-74 e 1979-80, e o colapso da União Soviética em 1989-90, que tiveram impactos profundos nas emissões globais de CO<sub>2</sub>. No entanto, a desaceleração recente não pode ser atribuída a crises econômicas, mas sim a mudanças estruturais, principalmente a crescente adoção de tecnologias de energia limpa [8]. Como exemplos disso, pode-se citar o aumento no último ano da capacidade global de energia eólica e solar fotovoltaica, atingindo recorde de 540 GW e resultando em um crescimento de 75% em relação a 2022, e as vendas globais de carros elétricos, que atingiram cerca de 14 milhões, um aumento de 35% em relação ao ano anterior. Essas mudanças têm desempenhado um papel

fundamental na contenção das emissões de dióxido de carbono [9].

Nas economias avançadas, as emissões de CO<sub>2</sub> já caíram significativamente. Desde 2007, as emissões das economias avançadas têm diminuído estruturalmente, mesmo com o crescimento econômico. Em 2023, estes países registraram uma queda de 4,5% nas emissões, enquanto o seu PIB cresceu cerca de 1,7%, destacando o desacoplamento entre crescimento econômico e emissões de carbono [8]. Vale ressaltar também que quase dois terços da redução das emissões nas economias avançadas em 2023 ocorreram no setor de eletricidade, como resultado do aumento da geração de eletricidade a partir de fontes renováveis e nucleares, que no último ano atingiram 50% da geração elétrica total. Em complemento a isso, a participação do carvão na geração de eletricidade caiu para uma mínima histórica de 17%. Esta transformação no setor elétrico reduziu a demanda por carvão nas economias avançadas para níveis não vistos desde o início do século XX. Outra fonte que tem ganhado espaço em substituição ao carvão é o gás natural, cuja participação na geração de eletricidade aumentou de 22% para 31% [10].

No entanto, o panorama é diferente nas economias emergentes e em desenvolvimento, onde a demanda por carvão foi o principal motor do crescimento das emissões de CO<sub>2</sub>. Desde 2019, as emissões globais relacionadas a energia aumentaram cerca de 850 Mt, com o carvão contribuindo com 900 Mt desse aumento. Este crescimento foi impulsionado por aumentos substanciais nas emissões de carvão na China e na Índia. O setor de transportes registrou o maior crescimento nas emissões, com um acréscimo global de quase 240 Mt em 2023, seguido pelo setor de energia. Essa disparidade regional é notável: enquanto as economias avançadas reduziram suas emissões, as economias emergentes continuaram a aumentá-las [8, 10]. A China, responsável por 35% das emissões globais de CO<sub>2</sub>, viu suas emissões em 2020 ultrapassarem o total das economias avançadas combinadas, sendo 15% mais altas em 2023. A Índia, agora a terceira maior emissora global, superou a União Europeia, enquanto os países em desenvolvimento da Ásia passaram a representar cerca de metade das emissões globais, em comparação com apenas um quarto em 2000 [11].

A implantação de energia limpa cresceu de forma exponencial nos últimos cinco anos. Em conformidade ao Acordo de Paris, vários governos ao redor do mundo promulgaram políticas importantes para apoiar a adoção de tecnologias de energia limpa. Desde 2019, esse crescimento superou o dos combustíveis fósseis em uma proporção de dois para um. A geração de eletricidade com fontes de baixas emissões cresceu cerca de 1.800 TWh, enquanto aquela à base de combustíveis fósseis cresceu menos de 850 TWh. A energia solar fotovoltaica é a protagonista, contabilizando um crescimento da sua capacidade instalada em mais de 80% de 2022 para 2023 e ultrapassando os 420 GW. A China expandiu sua capacidade solar fotovoltaica em 2,5 vezes, o que representou mais de 80% do aumento global. No Brasil, os acréscimos ultrapassaram os da Índia em 2023, com estímulos a instalações de micro e minigeração distribuída. Globalmente,

pode-se dizer que a energia solar fotovoltaica implantada entre 2019 e 2023 reduziu as emissões anuais de CO<sub>2</sub> em 1,1 bilhão de toneladas. A capacidade global de energia eólica também cresceu significativamente em 2023, com acréscimos de quase 60%, liderados principalmente por projetos terrestres que representaram mais de 85% do crescimento. Novamente foi a China quem liderou a expansão dessa fonte, sendo responsável por mais de 60% da expansão global [9, 12].

Para oferecer uma compreensão das mudanças que ocorrerão nos próximos anos, em um cenário de tendência, pode-se tomar como base o Cenário de Políticas Declaradas (STEPS) da Agência Internacional de Energia (IEA), que avalia a direção do sistema energético com base nas políticas atuais e em desenvolvimento. Ele fornece uma visão detalhada das políticas setoriais, considerando contribuições nacionais ao Acordo de Paris e outros programas específicos. O STEPS prevê uma demanda mais baixa para os principais combustíveis fósseis, petróleo, carvão e gás natural, refletindo as tendências de longo prazo de que as tecnologias de combustíveis fósseis estão perdendo participação de mercado para tecnologias de fontes renováveis. A demanda total por combustíveis fósseis deve diminuir a partir do ano de 2020, com um declínio médio de 3 exajoules (EJ) por ano até 2050 [11, 12].

No setor de petróleo, embora a demanda para petroquímicos, aviação e navegação continue a crescer até 2050 no STEPS, esses aumentos não compensam as reduções na demanda de transporte rodoviário e nos setores de energia e construção, resultando em um pico na demanda por petróleo antes de 2030, seguido por um declínio lento até 2050 [11].

A demanda global por carvão, após permanecer alta ao longo da última década, está prevista para diminuir nos próximos anos no STEPS. Esse declínio é reflexo da redução nas adições de capacidade de usinas termelétricas a carvão e de produção de ferro e aço, que são os maiores consumidores do recurso. Na China, o maior consumidor de carvão do mundo, as mudanças macroeconômicas e o crescimento das energias renováveis e nuclear apontam para uma diminuição do seu uso até meados da década de 2020 [11].

O crescimento do uso global de gás natural (GN) desacelera significativamente no STEPS, com um aumento médio anual de menos de 0,4% até 2030. As adições de capacidade de geração de energia a gás atingiram o pico em 2002 e têm diminuído desde então. Embora a utilização dessa fonte continue a se expandir, a demanda por gás natural no setor de energia deve diminuir até 2050, com uma queda acentuada na década de 2030 à medida que a co-combustão em usinas a gás é implantada em larga escala. Nas economias avançadas, já houve redução do GN, refletindo uma mudança para energias renováveis na geração de eletricidade e o aumento das bombas de calor [11].

Em conclusão, o panorama energético atual revela esforços significativos em direção à transição energética, com a desaceleração das emissões de CO<sub>2</sub> nas economias avançadas e o crescimento acelerado das energias renováveis globalmente. No entanto, a demanda crescente por carvão e petróleo nas economias emergentes e em desenvolvimento continua a ser um

desafio para alcançar as metas climáticas globais. A contínua implementação de tecnologias de energia limpa e políticas de apoio serão cruciais para manter o ímpeto na redução das emissões de gases de efeito estufa e garantir um futuro energético sustentável, porém, ainda há uma grande diferença entre as projeções do STEPS e os objetivos mais ambiciosos do Cenário de Emissões Líquidas Zero até 2050 (cenário NZE), como será mostrado a seguir.

#### A. O Objetivo Ainda Pode Ser Atingido?

Apesar das medidas já adotadas e da transição energética em curso, as emissões globais de CO<sub>2</sub> relacionadas à energia continuam aumentando e atingiram um recorde de 37 bilhões de toneladas (Gt CO<sub>2</sub>) em 2022, resultando em um aumento médio da temperatura global da superfície em cerca de 1,2 °C acima dos níveis pré-industriais.

O cenário STEPS não será suficiente para neutralizar as emissões de carbono, conforme previsão da Agência Internacional de Energia (IEA, sigla em inglês). Nesse cenário as emissões permanecem estáveis até o final da década de 2020 e depois caem lentamente para 30 Gt CO<sub>2</sub> em 2050. O resultado é um possível aumento da temperatura em 2,4 °C até 2100. Para limitar o aquecimento global a 1,5 °C, a IEA estima que as emissões devem cair mais de 5% ao ano, chegando a 24 Gt CO<sub>2</sub> em 2030 e zero líquido em 2050. A Fig. 3 ilustra a projeção das emissões globais de dióxido de carbono até 2050 pelos dois cenários.

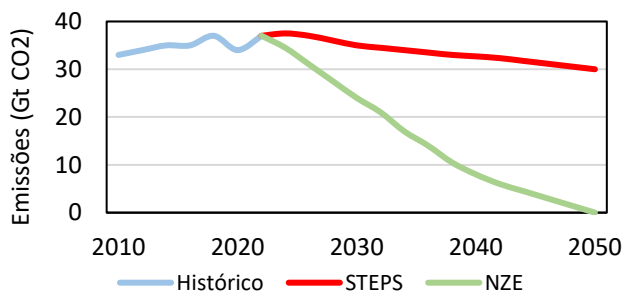


Fig. 3. Emissões de CO<sub>2</sub> registradas desde 2010 e previsões até 2050, por cenário. Fonte: adaptado de [11].

Pela diferença de emissões nos cenários projetados, nota-se que há grandes lacunas de implementação e ambição entre as políticas atuais e as metas de emissões líquidas zero.

Porém, nos próximos cinco anos espera-se alcançar marcas importantes envolvendo a expansão das fontes renováveis. Em 2024, a energia eólica e solar fotovoltaica podem, juntas, gerar mais eletricidade do que a hidreletricidade. Em 2025, pelas projeções, as energias renováveis podem ultrapassar o carvão e se tornar a maior fonte de geração de eletricidade. Em 2028, a previsão indica que as fontes renováveis responderão por mais de 42% da geração global de eletricidade, com a participação da energia eólica e solar fotovoltaica dobrando para 25% [2].

A IEA acredita que o caminho para limitar o aquecimento global a 1,5 °C é muito desafiador, mas ainda é possível. A agência destaca quatro motivos que justificam a possibilidade de atingir o cenário de neutralidade de emissões.

1) *Políticas de energia limpa intensificadas*: mais de 85% das emissões globais de energia e quase 90% do PIB mundial

estão sob compromissos de emissões líquidas zero até setembro de 2023. Noventa e três países e a União Europeia se comprometeram com essa meta. Governos, principalmente em economias avançadas, estão promovendo a adoção de energias renováveis, veículos elétricos, bombas de calor e eficiência energética em resposta à pandemia e à crise global de energia.

2) *Aceleração da implantação de energia limpa*: investimentos e implantação de energias limpas, como energia solar fotovoltaica, turbinas eólicas e veículos elétricos, estão crescendo rapidamente. Desde o Acordo de Paris em 2015, quase 1 TW de capacidade solar fotovoltaica foi adicionado, equivalente à capacidade elétrica total da União Europeia.

3) *Ferramentas para acelerar a redução de emissões*: as tecnologias necessárias para reduzir emissões até 2030 são maduras, comprovadas e eficientes. Ampliar as energias renováveis, melhorar a eficiência energética, aumentar a eletrificação e reduzir emissões de metano são a chave. Para tal, será necessário triplicar a capacidade global de energias renováveis para 11.000 GW e reduzir as emissões de metano em 75% até 2030.

4) *Respostas inovadoras*: o progresso em direção às emissões líquidas zero depende menos de tecnologias iniciais em 2023 quando comparado a 2021. A pesquisa e desenvolvimento em energia por empresas listadas superou US\$ 130 bilhões em 2022. O capital de risco para energia limpa permanece forte, apesar do cenário macroeconômico desafiador.

A Comissão de Transições Energéticas também acredita que ainda é possível e descreve um *roadmap* para atingir uma economia livre de emissões de carbono, conforme citado abaixo.

1) *Alcançar melhorias drásticas na produtividade energética*;

2) *Descarbonizar todos os setores da economia através da eletrificação*;

3) *Transição para uma matriz energética mais verde*;

4) *Adequação de recursos para eletricidade sem emissões de carbono (hidrogênio, bioenergia sustentável e CCS/U)*;

5) *Investimento massivo nas compensações de carbono*.

É unanimidade nessas e demais agências ambientais que para cumprir o objetivo estabelecido pelo Acordo de Paris, é preciso ter um aumento considerável da capacidade de geração por fontes renováveis e eletrificação, especialmente em economias emergentes.

#### IV. O PAPEL DAS FONTES DE ENERGIA NA BUSCA DO NET-ZERO

Com a previsão de eletrificação de diversos setores da economia, a demanda global por eletricidade deve crescer substancialmente até 2050. Este aumento pode chegar a 150% no cenário NZE, projetado pela IEA. A expansão adicional será suprida por fontes de eletricidade com baixas emissões, como energias renováveis, energia nuclear, combustíveis fósseis com captura de carbono e hidrogênio. Para atingir as emissões líquidas zero, a participação dos combustíveis fósseis não mitigados deverá diminuir significativamente, sendo praticamente nulo até 2050 [11].

As fontes renováveis forneceram 30% da eletricidade

mundial em 2022, e essa participação deve aumentar para 71% até 2030 no cenário NZE. Para chegar à neutralidade de emissões e cumprir as metas do Acordo de Paris, as fontes renováveis deverão ser responsáveis por 90% da geração global até 2050. A energia hidrelétrica, embora importante, enfrenta limitações de crescimento devido aos altos custos de capital inicial e ao impacto socioambiental. Outras renováveis, como bioenergia, geotérmica, energia solar concentrada e energia marinha, também desempenham um papel, mas a energia solar fotovoltaica e eólica são as tecnologias centrais para descarbonizar rapidamente a matriz de energia [2].

Portanto, a capacidade de renováveis deve aumentar em cerca de oito vezes até 2050 e as fontes solar fotovoltaica e eólica são os principais meios de reduzir as emissões do setor elétrico. A participação combinada dessas fontes na geração de eletricidade aumenta de 12% em 2022 para 40% em 2030 e 70% em 2050. Juntas, essas duas fontes podem representar 4 Gt CO<sub>2</sub> de reduções de emissões até o final da década atual. Pelas projeções da IEA, as adições da fonte solar fotovoltaica aumentam quase quatro vezes, chegando a 820 GW até 2030, um quarto do qual será dedicado à produção de hidrogênio. As adições de energia eólica, por sua vez, chegam a 320 GW até 2030, mais de 30% dos quais são offshore, e pouco mais de 10% de toda a energia eólica deverá se dedicar à produção de hidrogênio. A energia solar fotovoltaica rumo para se tornar a maior fonte de eletricidade até 2030, seguida da energia eólica na segunda posição [2].

A energia nuclear é a segunda maior fonte de energia de baixas emissões no mundo, atrás da hidrelétrica. Em economias avançadas, a energia nuclear é a maior fonte de eletricidade de baixas emissões. Para atingir a neutralidade de emissões de carbono, a capacidade nuclear deve aumentar de 417 GW em 2022 para mais de 900 GW até 2050, com crescimento principalmente na China e em outros mercados emergentes. Economias avançadas realizarão extensões generalizadas da vida útil dos reatores nucleares e buscarão construir novos projetos. Reatores de grande escala continuarão sendo a forma dominante de energia nuclear, mas o desenvolvimento e o interesse crescente em pequenos reatores modulares aumentam o potencial da energia nuclear a longo prazo.

O carvão é a maior fonte de eletricidade do mundo hoje, representando 36% do total, mas será superado pelas renováveis até 2025 em todos os cenários. Até 2030, com a desaceleração das novas construções e os esforços para a transição do carvão em muitos países, a participação dessa fonte na geração de eletricidade deve cair para menos de 15% no Cenário NZE. A geração de energia a carvão deve atingir o pico na China por volta de 2025 e logo após 2030 na Índia. A partir da próxima década, o uso do recurso deve continuar a diminuir à medida que China, Índia, Indonésia e outros mercados emergentes busquem alternativas sustentáveis [11].

O papel do gás natural nos sistemas de energia está evoluindo. Hoje, o GN fornece 22% da eletricidade global, além de serviços de flexibilidade e confiabilidade, mas a geração a gás deve atingir o pico antes do final da década. Sua participação na matriz de geração deve cair para menos de 20%

em 2030 e perto de 10% em 2050. Mercados em economias avançadas procurarão usinas a GN para flexibilidade em vez de produção em massa à medida que integram crescentes participações de energia solar fotovoltaica e eólica. Embora a geração a gás aumente em termos absolutos na China e em outros mercados emergentes, sua participação diminuirá gradualmente [11].

Os mercados globais de petróleo foram remodelados pela pandemia de Covid-19 e pela invasão da Ucrânia pela Rússia. A demanda global de petróleo em 2022 permaneceu ligeiramente abaixo dos níveis de 2019. Para atingir o Net-Zero, a demanda de petróleo deverá diminuir significativamente até 2050, com a maior parte do declínio atribuída à eletrificação dos transportes [11].

Em síntese, será preciso aumentar a capacidade de energias renováveis em três vezes até 2030 para atingir o cenário NZE. A expansão das fontes renováveis solar e eólica, o aumento da capacidade nuclear e a diminuição da dependência de combustíveis fósseis são necessárias para atingir esse objetivo. Economias avançadas e China devem alcançar 85% da capacidade necessária, enquanto outras nações precisam de políticas mais robustas. Além disso, será necessário melhorar a eficiência energética e investir na eletrificação, com carros elétricos e bombas de calor ganhando espaço na matriz energética. Infraestruturas variadas são necessárias e aumentar a ambição política antes do final da década é imperativo para limitar o aquecimento global, pois, pelas projeções da IEA, nota-se que apenas as políticas declaradas pelos países participantes do Acordo de Paris não serão suficientes para atingir o Net-Zero. Será preciso adotar medidas mais incisivas de transição energética, eliminando praticamente por completo a dependência dos combustíveis fósseis.

## V. ESTUDO DE CASO: O BRASIL PODE CHEGAR AO NET-ZERO?

O setor elétrico brasileiro está entre aqueles com maior participação de fontes renováveis na sua matriz, que se deve em grande parte ao emprego de energia hidrelétrica. O Brasil encerrou o ano de 2022 com 206,5 GW de capacidade instalada, sendo sua matriz elétrica formada principalmente por usinas hidrelétricas, representando 53,2%, seguido de termelétricas, com cerca de 21,4%, fotovoltaicas, com 11,8% e eólicas, que somam 11,50% na matriz. As hidrelétricas também foram responsáveis por mais da metade da geração elétrica do país, responsáveis por 427,3 TWh dos 677,2 TWh gerados em 2022. Ainda em termos de geração, as eólicas superaram as UTEs, que não foram muito utilizadas em função das condições hidrológicas favoráveis no ano de 2022. As fontes solar e eólica vêm apresentando um crescimento exponencial e têm ganhado muito espaço na matriz elétrica do Brasil. Em 2022, por exemplo, as plantas fotovoltaicas representaram um incremento de cerca de 80% da capacidade instalada e da geração, quando comparadas ao ano anterior. Já as eólicas expandiram sua participação em mais de 13% na geração total em relação a 2021 [13].

Em 2021 o Brasil foi o sexto maior emissor de GEEs no cenário global, emitindo um total de 2,3 bilhões de toneladas

brutas de gases de efeito estufa, com 3% do total global, ficando atrás de China, EUA, Índia, Rússia e Indonésia. Isso representou uma queda de 8% em relação a 2021, quando a emissão bruta foi de 2,5 bilhões de toneladas. Contudo, em termos per capita, o Brasil é considerado um país de baixa intensidade de emissões com cada brasileiro emitindo, em média, menos de 2,0 tCO<sub>2</sub>e. Isso representa cerca de 1/7 das emissões de um norte-americano e 1/3 de um cidadão europeu ou de um chinês [14]. A particularidade do Brasil é que a geração de GEE do país não está fortemente relacionada à geração de energia, mas sim às mudanças no uso da terra (desmatamento) e agropecuária, que, juntas, representam cerca de 75% de toda a poluição climática brasileira. Enquanto no mundo, o setor energético é responsável por 76% das emissões de GEE, no Brasil a matriz energética corresponde a 18% (412,486 MtCO<sub>2</sub>e) das emissões brutas de GEE [15]. A Fig. 4 representa o percentual de emissões por setor do país em 2022.

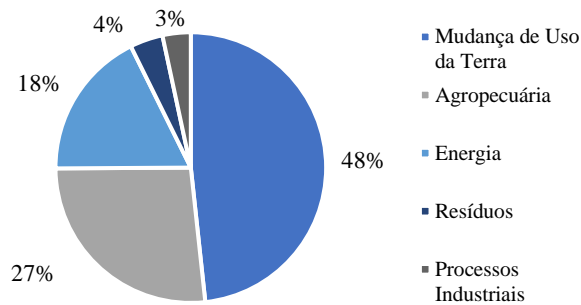


Fig. 4. Percentual de emissões de CO<sub>2</sub>e registradas por setor do Brasil em 2022. Fonte: adaptado de [15].

A NDC brasileira foi atualizada em 2023. O Brasil se comprometeu a reduzir as emissões de gases de efeito estufa em 48% até 2025 e em 53% até 2030, em relação às emissões de 2005. Ainda, o governo se comprometeu a alcançar o desmatamento zero até 2030, de acordo com o Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia Legal (PPCDAm). A Comissão Interministerial Permanente de Prevenção e Controle do Desmatamento, instituída pelo Decreto 11.367/2023, definirá e coordenará ações interministeriais para redução das taxas de desmatamento no território nacional. Mas, uma vez que os setores de Mudanças do Uso da Terra e Agropecuária não estão diretamente relacionados as fontes de energia, eles não serão abordados na análise. O foco do estudo de caso será a redução das emissões de GEE do Brasil no setor de energia [16].

Em 2022, os setores de energia e processos industriais e uso de produtos (PIUP) emitiram juntos 490,6 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente (CO<sub>2</sub>e), representando 21% das emissões brutas do Brasil. O setor de energia foi responsável por 18% e o PIUP por 3%. Ambos os setores apresentaram uma queda nas emissões em relação ao ano anterior: 5% em energia e 6% em PIUP. Entre 2015 e 2020, as emissões desses setores estavam em queda ou estagnação devido à desaceleração econômica e à pandemia de Covid-19. Em 2021, elas aumentaram devido à recuperação econômica e ao maior uso de combustíveis fósseis, mas voltaram a cair no ano seguinte, devido às condições

climáticas favoráveis para a geração hidrelétrica, que aumentou 18%, enquanto a geração termelétrica caiu 49%. O resultado foi uma redução de 36 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>e emitidas em 2022, comparado ao ano anterior. No entanto, a demanda por eletricidade continua crescendo, exigindo a expansão de outras fontes renováveis, como eólica e solar, em vez de depender apenas das fontes de energia tradicionais [14].

As emissões industriais também contribuíram para a queda geral, com uma redução de 4,1 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>e (-3%) devido à menor produção de aço e cimento. Em contraste, as emissões do setor de transportes aumentaram, alcançando 216,9 Mt CO<sub>2</sub>e, devido ao maior consumo de combustíveis fósseis. O transporte é a principal fonte de emissões dos setores de energia e PIUP, responsável por 44% do total [15]. A Fig. 5 apresenta o resultado consolidado das emissões nas atividades de energia e PIUP em 2022.

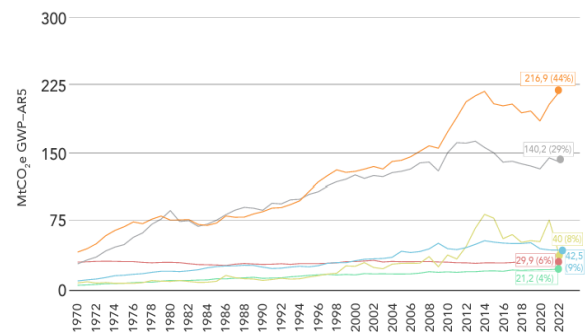


Fig. 5. Histórico de emissões de GEEs por ramos de atividade do Brasil. Fonte: [15].

O Centro Brasileiro de Relações Internacionais (CEBRI), junto com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), o Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID) e o Centro de Economia Energética e Ambiental (CENERGIA) desenvolveram um programa de transição energética, a fim de identificar a trajetória necessária para atingir a neutralidade das emissões de carbono até 2050, avaliando cenários para a descarbonização da matriz energética do país. As análises desse estudo servirão de base para as discussões contidas nesse capítulo [14].

#### A. Demanda

Do total de emissões no setor de energia, os setores de transportes, industrial e residencial são responsáveis por mais de 75%. A descarbonização desses setores enfrenta três grandes desafios:

- 1) Aumento esperado na demanda por serviços energéticos devido ao crescimento populacional e econômico, mesmo com melhorias na eficiência energética;
- 2) Necessidade de desenvolvimento e escalabilidade de soluções tecnológicas para mitigar emissões;
- 3) Altos custos de implantação e falta de mecanismos de financiamento e incentivo.

No setor de transportes, o Brasil já se destaca globalmente com 25% de energias renováveis (biocombustíveis), comparado a menos de 5% na média mundial. A indústria consolidada de biocombustíveis e a ampla rede de abastecimento oferecem uma vantagem competitiva. Os biocombustíveis avançados,

especialmente a partir da década de 2040, são vistos como o principal vetor de descarbonização, mas a eletrificação também ganhará importância. Apesar da ampla utilização de biocombustíveis, os combustíveis fósseis ainda predominam no setor de transportes, representando três quartos do volume total em 2020. A descarbonização do setor de transportes pode ser alcançada por meio de duas alternativas tecnológicas principais: eletrificação da frota e substituição dos combustíveis fósseis por biocombustíveis. Essas alternativas podem ser complementares e combinadas, como em veículos híbridos flex e veículos a célula combustível de etanol. Os cenários projetados exploram a complementaridade dessas alternativas, com políticas públicas influenciando a adoção de diferentes tecnologias. A eletrificação é vista como mais adequada para veículos leves, enquanto biocombustíveis são preferíveis para veículos pesados devido à logística de recarga complexa.

O setor industrial no Brasil contribui significativamente para as emissões totais do país, tanto pela queima de combustíveis fósseis quanto pelos processos produtivos, com a metalurgia e a fabricação de cimento sendo os maiores emissores e enfrentando os maiores desafios tecnológicos para a descarbonização. Na siderurgia, projeta-se a substituição de parte do consumo de carvão mineral por carvão vegetal, embora isso reduza a eficiência do processo. Já a maior eletrificação do setor pode proporcionar ganhos de eficiência. A descarbonização do setor de cimento é um dos maiores desafios devido às emissões intrínsecas ao processo de produção. A captura de carbono (CCS) e a substituição por fontes mais limpas de energia são consideradas para reduzir emissões. A petroquímica depende de petróleo e gás natural, mas enfrenta limitações devido à poluição por resíduos plásticos, exigindo uma mudança sistêmica na produção e descarte. Nos cenários de transição, a demanda energética do setor é projetada para ser mais baixa do que atualmente. As rotas para produção de petroquímicos a partir de matérias-primas renováveis já são uma realidade no Brasil, exemplificada pela unidade de produção de eteno verde da Braskem em Triunfo/RS, produzida a partir de etanol.

Para o setor residencial e de serviços, projeta-se um crescimento de aproximadamente 60% na demanda energética devido ao aumento da renda, posse de equipamentos eletrônicos e digitalização. A eletricidade se tornará a fonte mais importante para atender a essa demanda com menor emissão. Haverá também uma substituição significativa do GLP pelo gás natural, aumentando a demanda por gás natural quase dez vezes entre 2020 e 2050.

### *B. Oferta*

As agências concluíram que a expansão da capacidade de geração de energia no Brasil será predominantemente respondida pelas fontes eólica e solar. Isso resultará em uma redução da participação de hidráulicas para entre 30% e 55% da capacidade total. Essa mudança ocorre devido às limitações na construção de novos projetos hidrelétricos por causa dos impactos ambientais e sociais, além da competitividade das outras fontes renováveis. Pelas projeções do programa de transição energética, a participação de fontes renováveis na

geração elétrica brasileira ultrapassará 90%, com a biomassa ganhando destaque na descarbonização dos transportes. A energia eólica aumentará sua participação para até 47% e a solar também crescerá significativamente.

Para atender à crescente demanda de energia elétrica, em função da eletrificação dos outros setores, sem crescimento da geração hidrelétrica, as fontes eólica e solar devem assumir o protagonismo. O programa projeta que a capacidade de geração elétrica por energia eólica deverá aumentar em cerca de 50 a 200 GW até 2050, a depender do cenário. Já a energia solar fotovoltaica deve expandir a sua capacidade em aproximadamente 60 a 75 GW nos próximos 30 anos. Vale destacar que o aumento significativo de fontes renováveis intermitentes, sem o aumento das fontes despacháveis, somente será possível através da adoção de sistemas de armazenamento, com a entrada de aproximadamente 2 GW de capacidade instalada de baterias eletroquímicas.

O crescimento da geração de eletricidade exigirá a expansão das linhas de transmissão do Sistema Interligado Nacional (SIN), que deverá crescer entre 181 a 221 GW até 2050, abrangendo tanto os subsistemas internos quanto o intercâmbio de energia entre eles. Também é esperada uma melhoria na eficiência das novas instalações de transmissão e distribuição, reduzindo as perdas no transporte. Embora o Brasil tenha um elevado potencial eólico e solar, existem desafios relacionados à modernização do setor elétrico, necessária para suportar mudanças operacionais e de transação de energia, permitindo a valorização das fontes renováveis e a introdução de novas tecnologias e capacidades, sem aumentar os custos para o consumidor e, possivelmente, até reduzindo-os.

Em relação aos combustíveis fósseis, se os objetivos do Acordo de Paris forem cumpridos, a produção de petróleo do Brasil poderá cair pela metade até 2035, mas o petróleo brasileiro, com baixa intensidade de carbono e baixo custo de produção, será crucial no mercado global. A indústria de óleo e gás do Brasil apresenta um dos menores níveis de emissões de GEE no mundo, com o pré-sal produzindo petróleo com intensidade de carbono abaixo de 10 kg CO<sub>2</sub>eq/b. O setor precisa inovar para reduzir sua dependência de carbono e diversificar seu portfólio, com investimentos em captura e armazenamento de carbono, eficiência energética, energias renováveis e hidrogênio de baixo carbono. A produção nacional de petróleo deve continuar crescendo para atender à demanda externa, especialmente no sudeste asiático. O gás natural seguirá um padrão similar, com aumento da produção e foco no mercado interno. A redução do consumo doméstico de derivados de petróleo levará a uma menor utilização das refinarias, que poderão ser convertidas em biorrefinarias ou complexos energéticos alinhados à transição energética. Em todos os cenários de neutralidade de carbono, há uma redução na participação do petróleo na matriz energética brasileira e um aumento na produção nacional para exportação.

Já os biocombustíveis permitem aproveitar a infraestrutura existente para combustíveis fósseis e descarbonizar setores difíceis de eletrificar. Eles serão fundamentais para a descarbonização do Brasil, especialmente para setores de

transporte de difícil eletrificação e para captura e armazenamento de CO<sub>2</sub>, pois permitem a remoção líquida de dióxido de carbono da atmosfera. O biometano, derivado do biogás, é outro combustível importante na transição energética, substituindo gradualmente o gás natural. O Brasil tem um grande potencial de produção de biometano, podendo alcançar 73 milhões de m<sup>3</sup>/dia. A regulamentação recente fomenta o uso de biometano como fonte renovável de energia. Nos cenários projetados, a produção de biometano pode chegar a 18 milhões de m<sup>3</sup>/dia até 2050. O biometano, associado à tecnologia de CCS, pode gerar emissões negativas de CO<sub>2</sub>, sendo essencial para atingir as metas climáticas.

Ao analisar a matriz energética brasileira, pode-se concluir que o país já possui uma matriz energética diversificada, com uma predominância de fontes renováveis. A energia hidrelétrica continuará a ser uma fonte importante de energia limpa no Brasil. A modernização das usinas existentes e o desenvolvimento de pequenas centrais hidrelétricas podem aumentar a eficiência e reduzir impactos ambientais. Já a energia solar tem um enorme potencial de crescimento, com condições climáticas favoráveis em grande parte do território. Da mesma forma, a energia eólica, com um potencial de expansão de até 200 GW, contribuirá significativamente para a descarbonização da matriz energética. A expansão dessas duas fontes, junto com investimentos em tecnologias de armazenamento, será crucial para reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> e garantir flexibilidade e segurança ao sistema elétrico brasileiro. A produção de biocombustíveis, como o etanol e o biodiesel, é uma área em que o Brasil tem liderança global. A expansão da produção e uso de biocombustíveis pode reduzir as emissões no setor de transporte, contribuindo para a meta de Net-Zero. No entanto, o país ainda enfrenta desafios pela dependência de combustíveis fósseis no setor de transportes. Para descarbonizar sua matriz energética, o Brasil precisará de políticas públicas que incentivem a transição energética, incluindo incentivos fiscais para tecnologias que auxiliem esse processo. Além disso, investimentos significativos em infraestrutura de transmissão e tecnologias de armazenamento serão necessários para superar obstáculos relacionados a confiabilidade e segurança energética.

Por fim, deve-se ressaltar que o Brasil já é referência em energias renováveis e tem plenas condições de descarbonizar por completo a sua matriz. Porém, o Net-Zero só poderá ser atingido se o país cumprir a sua meta de zerar o desmatamento, o que não será tarefa fácil. Acima disso, será preciso no curto prazo, até 2025, reduzir o desmatamento do país pela metade, o que reduziria a emissões brutas de GEEs em aproximadamente 500 MtCO<sub>2</sub>e e contribuiria significativamente para cumprir a NDC de reduzir as emissões de gases de efeito estufa em 48% até 2025.

## VI. CONCLUSÃO

Esse estudo analisou o panorama energético atual do ponto de vista de emissões globais, discutiu sobre a viabilidade de atingir o Net-Zero de emissões de carbono até 2050 e explorou a situação atual das emissões de carbono no Brasil e os desafios

que o país deverá superar para cumprir o que definiu em sua Contribuição Nacionalmente Determinada.

O Brasil possui um potencial significativo para liderar a transição energética devido à sua matriz energética já majoritariamente renovável, com destaque para a energia hidrelétrica, eólica e solar. No entanto, o país enfrenta desafios substanciais, como a dificuldade de descarbonização do setor de indústria e transportes, o desenvolvimento de tecnologias para compensar a intermitência das fontes renováveis e a redução da dependência estrutural de combustíveis fósseis. A diversificação e complementariedade da matriz energética será essencial para cumprir o objetivo. É preciso aumentar a participação das fontes renováveis na matriz elétrica para eletrificar os diversos setores do país, ao mesmo tempo em que evolui a transmissão de energia elétrica e sistemas de armazenamento de energia para manter a segurança energética. O hidrogênio e o biometano precisam ser explorados, aproveitando a infraestrutura existente e substituindo gradualmente os combustíveis fósseis, principalmente derivados do petróleo e gás natural. A produção de biocombustíveis, como etanol e biodiesel, também auxiliará na descarbonização, especialmente nos setores de transporte de difícil eletrificação.

Conclui-se que, embora o Brasil tenha feito progressos significativos rumo a uma matriz energética mais limpa, ainda há um longo caminho a percorrer para alcançar o Net-Zero. O cumprimento das metas de redução de emissões dependerá da continuidade e intensificação de políticas públicas eficazes, investimentos em tecnologia e inovação, e da otimização do uso dos recursos naturais. A luta contra o desmatamento é crucial, pois o sucesso na redução das emissões está intimamente ligado às mudanças no uso da terra. A redução do desmatamento pela metade até 2025 poderia reduzir as emissões brutas de GEEs em aproximadamente 500 MtCO<sub>2</sub>e, contribuindo significativamente para cumprir a NDC de reduzir as emissões de gases de efeito estufa em 48% até 2025.

As principais limitações desta análise incluem a dificuldade de mapear com precisão as emissões de GEEs e a variabilidade nas políticas governamentais. Futuras pesquisas devem focar em estratégias específicas para superar esses desafios e acelerar a transição energética no país, através de um esforço coordenado entre governo, empresas e sociedade. Conclui-se que, embora o Brasil tenha o potencial e os recursos necessários para atingir o Net-Zero, os desafios mencionados precisam ser abordados de maneira eficaz para que o país possa realmente alcançar suas metas climáticas dentro do prazo estipulado.

## VII. REFERÊNCIAS

- [1] R. Black et al., “Taking Stock: A global assessment of net zero targets”, Energy & Climate Intelligence Unit and Oxford Net Zero, março de 2021.
- [2] IEA - International Energy Agency, “Net Zero Roadmap: A Global Pathway to Keep the 1.5 °C Goal in Reach”, Paris, 2023.
- [3] ETC - Energy Transitions Commission, “Making Mission Possible: Delivering a Net-Zero Economy”, Londres, 2020.
- [4] S. Fankhauser et al., “The meaning of net zero and how to get it right”, Nat. Clim. Chang., vol. 12, n.º 1, pp. 15–21, dezembro de 2021.
- [5] M. E. M. Udaeta et al. Aula 7: Mecanismos de Desenvolvimento Limpo. Powerpoint de apoio à disciplina de Tópicos Avançados em Sistemas Energéticos Para um Desenvolvimento Limpo, lecionada na pós-



graduação de Engenharia Elétrica na Universidade de São Paulo, São Paulo, 2024.

- [6] IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change, "Climate Change 2001: Synthesis Report. A Contribution of Working Groups I, II, and III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change", Cambridge University Press, Cambridge, 2001.
- [7] IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change, "Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change", Cambridge University Press, Cambridge, 2021.
- [8] IEA - International Energy Agency, "CO2 Emissions in 2023", Paris, 2024.
- [9] IEA - International Energy Agency, "Renewables 2023", Paris, 2024.
- [10] IEA - International Energy Agency, "Coal 2023", Paris, 2024.
- [11] IEA - International Energy Agency, "World Energy Outlook 2023", Paris, 2023.
- [12] IEA - International Energy Agency, "Clean Energy Market Monitor – March 2024", Paris, 2024.
- [13] EPE – Empresa de Pesquisa Energética, "Anuário Estatístico de Energia Elétrica", Brasília, 2023.
- [14] Centro Brasileiro de Relações Internacionais, "Programa de Transição Energética – Neutralidade de carbono até 2050: cenários para uma transição eficiente no Brasil", Rio de Janeiro, fevereiro de 2023.
- [15] SEEG – Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa, "Análise das Emissões de Gases de Efeito Estufa e suas Implicações Para as Metas Climáticas do Brasil", Piracicaba, 2023.
- [16] Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. (2023). Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC) do Brasil para o Acordo de Paris no âmbito da UNFCCC (3ª atualização). [Online]. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/mudanca-do-clima/NDC>.

### VIII. BIOGRAFIAS



**Bruno Ecker Pizani** possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná (2020). Possui MBA em Business Intelligence pelo Centro Universitário União das Américas Descomplica (2023). Atualmente cursa Mestrado em Engenharia Elétrica pelo Grupo de Energia do Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (GEPEA/EPUSP). Sua jornada acadêmica contempla estudos relacionados a sistemas de potência, modelos de otimização,

microrredes de energia elétrica e mercados de energia. Profissionalmente, atua como Analista Sênior de Research em Comercialização de Energia Elétrica. Tem experiência com mercado de energia brasileiro, modelos de formação de preços de energia (Newave, Decomp e Dessem), análises meteorológicas voltadas ao mercado de energia brasileiro, estrutura tarifária e regulatória do setor elétrico brasileiro e formação de portfólio.



**André Luiz Veiga Gimenes** é professor do Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Coordenador do GEPEA USP - Grupo de Energia do PEA EPUSP. Possui graduação em Engenharia de Energia e Automação Elétricas pela Universidade de São Paulo (1997), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade de São Paulo (2000) e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade de São Paulo (2004). Realiza pesquisas na área de Engenharia Elétrica,

com ênfase em Planejamento Energético e Gestão de Energia, atuando principalmente nos seguintes temas: energia solar, planejamento energético, energia elétrica, planejamento integrado de recursos, desenvolvimento sustentável e gestão energética. É membro do IEEE - Power & Energy Society (PES).

**Miguel Edgar Morales Udaeta** Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Facultad de Ciencias y Tecnologia, Universidad Mayor de San Simón (1984), mestrado em Engenharia Elétrica pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - EPUSP (1990), doutorado em Engenharia Elétrica pela EPUSP

(1997), pós-doutorado em planejamento energético e planejamento integrado de recursos pela USP (1999 e 2003), e, livre-docência pela EPUSP (2012). Atualmente é professor de pós-graduação e pesquisador no GEPEA/EPUSP (Grupo de Energia do Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo). Possui experiência na área de Engenharia de Energia e Economia de Energia, com ênfase em Planejamento Integrado de Recursos, Cadeia Produtiva do Gás Natural, Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável, atuando principalmente nos seguintes temas: energia, planejamento energético, desenvolvimento sustentável, análise integrado de recursos, recursos energéticos, energia rural e energia e meio ambiente.



**Vanessa Meloni Massara** possui graduação em Engenharia Civil pela Escola de Engenharia Mauá (1996), mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana pela Escola Politécnica - USP (2002), doutorado em Energia pelo Instituto de Energia e Ambiente - USP (2007) e Pós-doutorado em Engenharia de Produção pela Escola Politécnica - USP (2012). Tem experiência na área de Planejamento Urbano e Regional, com ênfase em Infra-Estruturas Urbanas e Regionais, atuando principalmente nos seguintes temas:

desenvolvimento urbano, infraestruturas, gás natural e o mix: biometano/hidrogênio, energia e certificação verde em construção civil, método não destrutivo de inserção de redes subterrâneas, cidade, RM e Estado de São Paulo. Pesquisadora colaboradora do Grupo de Energia GEPEA do Departamento de Energia e Automação Elétricas da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.



**Viviane Tavares Nascimento** possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (2008). Trabalhou como analista de suporte de sistemas no Banco Itaú Unibanco por cinco anos. Tem experiência na área de Ciência da Computação, com ênfase em Linguagens de Programação Assembler e Cobol. Especializada em Sistema Operacional z.OS, plataformas transacional CICS e IMS. Possui curso de especialização "MBA em Inovação Tecnológica em Redes de Computadores", ministrado pelo

Laboratório de Redes da Escola Politécnica da USP. Trabalhou desde 2014 como pesquisadora no Laboratório de Sustentabilidade, vinculado à Escola Politécnica da USP, atuando em projetos aliando conceitos de redes de computadores, eficiência energética e desenvolvimento sustentável. Trabalhou em projetos de eficiência energética para redes de computadores até a defesa do mestrado, com foco na gestão de contratos e consumo de energia de Data Centers para entrada em programas de resposta à demanda. Desde 2017 trabalha como pesquisadora junto ao Grupo de Energia do Departamento de Engenharia de Energia e Automações Elétricas (GEPEA), grupo também vinculado à Escola Politécnica. Nesse período atuou em diferentes projetos, com destaque para o projeto de sistemas de armazenamento integrado a outras fontes energéticas, projeto de PD ANEEL e uma parceria com a CPFL. Concluiu o Doutorado com tema em viabilidade de sistemas de armazenamento para o Brasil em 2022.