

Principais atributos necessários a serem observados na arquitetura do planejamento energético de longo prazo

M.L.G.C. Santana, M.E.M. Udaeta, V. Nascimento, V. M. Massara

Abstract-

- The objective of this work is to analyze the main attributes to be considered in long-term electric system planning, introducing the idea of sustainable energy transition. Methodologically, we characterize energy planning in the current context of socioeconomic development and energy systems, exploring the characteristics of available energy sources for electricity production along with their potential resources and reserves, considering various technological possibilities for global electrical decarbonization. There are several viable technologies to establish a plan for decarbonizing the global electrical matrix. However, due to the intermittent characteristics of renewable sources, such as solar and wind, it is not feasible, with currently available technologies, to rely exclusively on them during this process. Conventional and flexible sources, such as natural gas, coal, and nuclear, will still play a crucial role as transition fuels in this context. Moreover, it is concluded that it is essential to recognize and acknowledge that energy availability varies according to each geographic region, as well as specific energy needs. Therefore, the path towards decarbonization and meeting the Paris Agreement goals will be unique for each nation, with no universally applicable approach.

Index Terms-- energy transition, energy reserve, energy planning, energy generation expansion, generation sources.

Resumo-- O objetivo deste trabalho é analisar os principais atributos necessários a ser considerados no planejamento do sistema elétrico de longo prazo introduzindo a ideia da transição energética sustentável. Metodologicamente caracterizamos o planejamento energético no contexto atual do desenvolvimento socioeconômico e dos sistemas energéticos, desenvolve-se a exploração das características das fontes de energia disponíveis para fins de produção de energia elétrica com seus potenciais recursos e reservas disponíveis, considerando as diversas as possibilidades tecnológicas para a descarbonização elétrica global. Existem diversas tecnologias viáveis para estabelecer um plano de descarbonização da matriz elétrica global. No entanto, devido às características intermitentes das fontes renováveis, como solar e eólica, não é viável, com as tecnologias atualmente disponíveis, depender exclusivamente delas durante este processo. Fontes convencionais e flexíveis, como gás natural, carvão e nuclear, ainda desempenharão um papel crucial como combustíveis de transição nesse contexto. No mais, é concluído que é

imprescindível reconhecer e assumir que a disponibilidade energética varia de acordo com cada região geográfica, assim como as necessidades energéticas específicas. Portanto, o caminho rumo à descarbonização e ao cumprimento das metas do Acordo de Paris será único para cada nação, não havendo uma abordagem universal aplicável.

Palavras chaves-- transição energética, reserva energética, planejamento energético, expansão geração de energia, fontes de geração.

I. INTRODUÇÃO

É consenso global que a temperatura do planeta aumentou 0,8°C nos últimos 120 anos, em decorrência de diversos fatores amplamente relacionados à ações do homem. Caso o mesmo ritmo de emissões de Gases do Efeito Estufa – GEE continuem, estimativas apontam que tal aumento de temperatura poderá chegar a 6,5-8°C até 2100 [1].

Buscando garantir ações mitigadoras e o estabelecimento de metas globais para se evitar tal cenário, em 2015 o Acordo de Paris foi assinado por mais de 190 países e representa um tratado internacional que possui como principal objetivo combater as mudanças climáticas e intensificar as ações e investimentos necessários para um futuro sustentável com baixas emissões de carbono, tendo como principal meta manter o aumento da temperatura média global bem abaixo de 2°C acima dos níveis pré-industriais com esforços voltados a se limitar o aumento da temperatura a 1,5°C [2].

Assim, para que seja possível o cumprimento da meta estabelecida faz-se necessário a redução nas emissões de gases de efeito estufa causadas principalmente pelo uso de combustíveis fósseis. Atualmente, a geração de eletricidade é uma das principais fontes de emissões mundiais devido à grande dependência de combustíveis fósseis, de modo que, os países estão investimento em maneiras de atender suas respectivas demandas elétricas por meio de tecnologias com baixa emissões de GEE, geralmente utilizando formas de energia renovável como as fontes solar e a eólica [3].

Seja através de políticas públicas de incentivo, certificados de energias renováveis, créditos fiscais ou outros mecanismos,

M.L.G.C. Santana é mestranda na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (e-mail: mayralgcastro@gmail.com).

M. E. M. Udaeta é professor titular na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (udaeta@pea.usp.br).

V. Nascimento é professora na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (viviane.tav.nascimento@gmail.com).

V. M. Massara é professora na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (vanessa.massara@gmail.com).

existem alguns objetivos que levam os governos a exigir uma mudança da dependência de combustíveis fósseis para energias renováveis: alcançar maior segurança e independência energética, mitigar impactos ambientais negativos e desenvolver setores de manufatura e serviços que contribuam para a prosperidade econômica e criem oportunidades de emprego. Ademais, não há dúvidas que a transição energética não será algo que ocorrerá de forma rápida ou fácil e, como regra geral, a história nos diz que as transições exigem longos períodos de tempo para evoluir sendo que as condições econômicas, sociais e políticas prevalecentes, entre outras, influenciarão o design da política de transição a ser aplicada [6], [7], [8].

Dado esse cenário de esforço mundial para uma transição energética sustentável, é possível notar que a utilização de recursos renováveis vem aumentando em todo o mundo. De acordo com dados da International Energy Agency – IEA ao se analisar a oferta de energia elétrica mundial de 2010 a 2022 é possível notar um crescimento de 10 pontos percentuais na utilização de fontes renováveis, além de um decréscimo na utilização da fonte nuclear e carvão que teve queda de 4 pontos percentuais neste período– como pode ser observado na figura 1. De modo que, a oferta mundial de energia elétrica renovável passou a representar 29% em 2022, frente aos 19% anteriores em 2010 [4].

No entanto, a participação das energias renováveis nas aplicações de aquecimento e transporte pouco mudou na última década, apesar dessas aplicações representarem cerca de 75% do consumo final total de energia sendo atualmente majoritariamente atendido por combustíveis fósseis intensivos em CO₂ [5]. Por exemplo, o consumo global de petróleo cresceu mais de 14 milhões de barris por dia acima do nível de 2003, segundo o British Petroleum Statistical Review de 2015. O mesmo se aplica ao gás natural, onde um aumento constante no consumo foi observado até o final de 2015 e com o uso do carvão que aumentou de forma constante até 2014 com uma ligeira queda desde então [6].

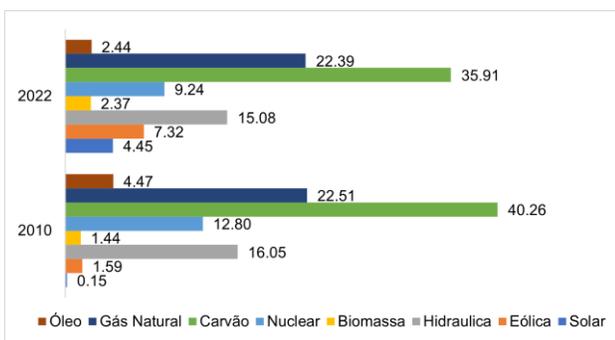


Fig. 1. Oferta de Energia Elétrica Mundial: 2010 versus 2022 (%), elaborado pelo autor a partir de [4]

Para a continuação bem-sucedida da transição energética mundial e a redução das emissões de CO₂, é necessária uma visão integrada de todos os setores energéticos (eletricidade, aquecimento e transporte), sendo que a integração destes diferentes setores é vista como uma das principais soluções para

se alcançar as metas climáticas de forma econômica, por exemplo, através da substituição das demandas de energia para aquecimento e transporte por eletricidade proveniente de fontes de energia renovável – a chamada eletrificação das economias [5], [7], [8], [10].

Dada a complexidade de se estabelecer o planejamento energético em razão da quantidade de variáveis envolvidas, análises multicritério tem atraído a atenção dos tomadores de decisão por um longo tempo sendo usualmente aplicadas ao redor do mundo. Os métodos de tomada de decisão multicritério (MCDM) lidam com o processo de tomada de decisões na presença de múltiplos objetivos em que um tomador de decisão precisa escolher entre critérios quantificáveis ou não e múltiplos critérios. Os objetivos geralmente são conflitantes e, portanto, a solução depende muito das preferências do tomador de decisão e deve ser um compromisso. Além disso, na maioria dos casos, diferentes grupos de tomadores de decisão estão envolvidos no processo. Cada grupo traz diferentes critérios e pontos de vista, que devem ser resolvidos dentro de um quadro de compreensão e compromisso mútuo. Esse tipo de aplicação incluem áreas como sistemas de manufatura integrada, avaliações de investimentos em tecnologia, gestão de água e agricultura, além do planejamento energético [9].

Ademais, um planejamento energético robusto deve levar em consideração os recursos e reservas energéticas existentes para garantir uma oferta de energia confiável, acessível e sustentável a longo prazo. De modo geral, temos que recurso energético é a quantidade total de uma substância energética que está presente na natureza, independentemente da viabilidade econômica ou tecnológica de sua extração, incluindo todas as quantidades conhecidas e desconhecidas da substância [11]. Já as reservas energéticas representa a porção de um recurso energético que é economicamente viável para ser extraída com a tecnologia atual, sendo comprovadas e com alta certeza de extração [12].

O planejamento energético eficaz envolve considerar a disponibilidade de reservas e recursos além das especificidades da demanda energética local, bem como os impactos ambientais, sociais e econômicos associados à exploração e utilização de diferentes fontes de energia. Estratégias de planejamento energético que visam promover a eficiência energética, diversificação da matriz energética e transição para fontes renováveis podem ajudar a mitigar os impactos negativos dos desafios relacionados às reservas e recursos energéticos.

Dado que a disponibilidade energética em cada região geográfica é única, assim como sua demanda energética, o caminho para a descarbonização e atingimento das metas do Acordo do Paris será individual para cada nação não existindo, portanto, uma receita única a ser aplicada.

Por exemplo, a Alemanha tem direcionado grandes esforços na descarbonização da produção de energia elétrica com foco em sua eletrificação econômica e descarbonização dos setores de aquecimento e transportes [10]. Por outro lado, a Jordania possui como uma de suas principais demandas energéticas atuais e futuras a dessalinização da água que pode ser realizada por meio elétrico, com a aplicação da Osmose Reversa (OR),

ou por meio de processo de aquecimento, por meio da dessalinização (destilação) multi estagiada por flasheamento (MSF) e, a depender do caminho escolhido em seu planejamento, demandará a utilização e desenvolvimento de aplicações tecnológicas para exploração de recursos energéticos distintos [7].

Ainda, a abordagem convencional de eletrificação da economia não é apropriada ao caso das comunidades da África Subsaariana. A África tem um vasto potencial de energia renovável não explorado, que poderia ser utilizado de forma ambientalmente amigável para atender às demandas de energia do continente várias vezes. O “problema de acesso à energia” não é, de fato, devido à falta de recursos energéticos, mas sim a uma combinação de desafios financeiros, políticos e sociológicos relacionados ao desenvolvimento dos recursos energéticos locais. Apesar de sua grande população – ultrapassando um bilhão em 2009 – a maior parte do continente africano é pouco povoada. Esse fato, aliado ao baixo consumo de energia per capita, à alta proporção de população rural não eletrificada e à urgente necessidade de renovação do sistema de rede, cria um contexto ideal para o desenvolvimento sustentável de energia baseado em fontes de energia renováveis descentralizadas [13].

Assim, a proposta deste artigo será discutir os principais atributos necessários a serem observados quando do planejamento elétrico de longo prazo, além da exploração das características das fontes de energia disponíveis para fins de produção de energia elétrica com seus potenciais recursos e reservas disponíveis.

II. ASPECTOS RELACIONADOS AO PLANEJAMENTO ENERGÉTICO SUSTENTÁVEL

A energia em suas mais diversas formas tornou-se um dos temas mais discutidos globalmente, dada sua importância nos aspectos econômicos, políticos, sociais e ambientais. A industrialização do mundo e os avanços tecnológicos trouxeram uma maior necessidade de energia para o globo como um todo. No entanto, as quantidades de reservas dos recursos energéticos tradicionais variam de um país para outro, resultando em grande preocupação ambiental, sérios conflitos políticos, dependência econômica inevitável e importantes consequências sociais. A situação existente e as estimativas futuras das necessidades de energia levam as pessoas a buscar fontes alternativas de energia. Além disso, as atuais e futuras possíveis consequências ambientais, econômicas, políticas e sociais negativas também forçam os países a se inclinarem para as fontes de energia renovável- ainda mais tendo em vista os acordos mundiais assumidos perante o Acordo de Paris e a COP21. Nesse sentido, a energia renovável tornou-se a resposta para o planejamento energético sustentável.

O desenvolvimento sustentável pode ser definido como atender às necessidades da geração presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de atenderem suas próprias necessidades [14], sendo a sustentabilidade usada para definir o equilíbrio desejado entre o crescimento econômico e a preservação ambiental. A energia é um dos principais fatores

que devem ser considerados nas discussões sobre desenvolvimento sustentável e o planejamento energético envolve encontrar um conjunto de fontes para atender às necessidades de energia de maneira ideal equilibrando aspectos ambientais, técnicos, econômicos e sociais no espaço e no tempo [15].

Idealmente, a aplicação de fontes de energia renováveis, limpas e de baixo custo deveriam ser o foco do desenvolvimento sustentável de todos os países, mas infelizmente nenhuma das fontes de energia alternativas podem ser aplicadas em todos os focos de aplicação pretendidos ou até mesmo, em todas as regiões dada a limitação geográficas existentes. Assim, determinar a política energética apropriada pode ser visto como um problema de tomada de decisão com múltiplos critérios (MCDM) e é um processo estratégico de longo prazo [16].

Existem alguns critérios de avaliação utilizados em estudos de MCDM conduzidos sobre questões energéticas [17]:

- a. Técnicos: eficiência, relação de energia primária, segurança, confiabilidade, maturidade, etc;
- b. Econômicos: custo de investimento, custo de operação e manutenção, custo do combustível, valor presente líquido, período de retorno, vida útil, custo anual equivalente, etc;
- c. Ambientais: emissão de CO₂, emissão de NO_x, emissão de SO₂, emissão de partículas, uso do solo, ruído, etc.;
- d. Sociais: aceitabilidade social, criação de empregos, benefícios sociais, etc.

Para o desenvolvimento sustentável em escala nacional e global, diferentes alternativas de médio e longo prazo que permitam aumentar a variação das fontes de energia e diminuir a dependência do fornecimento externo devem ser consideradas. As fontes de energia nativas e renováveis devem ser avaliadas de maneira sensível e promovidas do ponto de vista ambiental e técnico [16].

III. ASPECTOS RELACIONADOS AO PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO DA GERAÇÃO DE ENERGIA

O planejamento da expansão da capacidade de geração de energia envolve múltiplos objetivos muitas vezes conflitantes e difíceis de mensurar, como os objetivos econômicos, preocupações sociais e ambientais.

No problema do planejamento da expansão da geração de energia, o objetivo é identificar a demanda total de energia necessária e como atendê-la ao longo do tempo, definindo a potência a ser instalada durante o período de planejamento, o tipo de fonte e a tecnologia de conversão de energia a ser utilizada. As funções objetivo geralmente consideradas para resolver este problema incluem a minimização do custo total de expansão (ou apenas dos custos de produção) no horizonte de planejamento, a minimização das emissões de poluentes (SO₂, CO₂, NO_x), a minimização de um substituto para impactos ambientais (um indicador econômico obtido pela monetização das emissões de poluentes, um indicador de toneladas-equivalentes ou um indicador agregado adimensional), a maximização da confiabilidade/segurança do sistema de

abastecimento, a minimização dos resíduos radioativos produzidos, a minimização da dependência externa do país e a minimização de um indicador de risco/dano potencial [10], [18].

Além disso, neste planejamento devem ser levado em consideração eventuais limitações de capacidade, requisitos mínimos de carga, segurança de suprimento e capacidade para atendimento da demanda (incluindo uma margem de reserva para controle de risco de deficit), disponibilidade de recursos, restrições tecnológicas (por razões técnicas ou políticas como, por exemplo, limitações no uso da energia nuclear), cotas de combustível doméstico, segurança energética (para garantir uma certa diversificação do fornecimento de energia), limites para a energia comprometida, limitações orçamentárias, disponibilidade operacional das unidades geradoras e taxa de crescimento da adição de nova capacidade [10], [13], [18].

IV. PRINCIPAIS TECNOLOGIAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Um dos problemas mais comuns do planejamento energético é escolher entre várias fontes de energia e tecnologias a serem promovidas dado o contexto regional de cada nação. Tecnologias baseadas em energia geotérmica, energia solar, energia eólica, energia hidrelétrica e biomassa estão entre as alternativas mais populares [3], [4], [5], [7].

De acordo com a International Energy Agency (IEA, 2023) as principais fontes de produção de energia elétrica em termos de capacidade instalada atualmente são carvão, gás natural, hidráulica, solar, eólica, óleo, nuclear e outras tecnologias renováveis. Além disso, como pode ser observado na figura 2 na última década houve uma grande evolução na capacidade instalada renovável mundial em linha com os esforços de descarbonização realizados neste período.

Nesta seção será abordado as principais características de cada uma dessas principais fontes primárias, sendo explorado qual a situação atual em termos de reservas disponíveis no âmbito mundial.

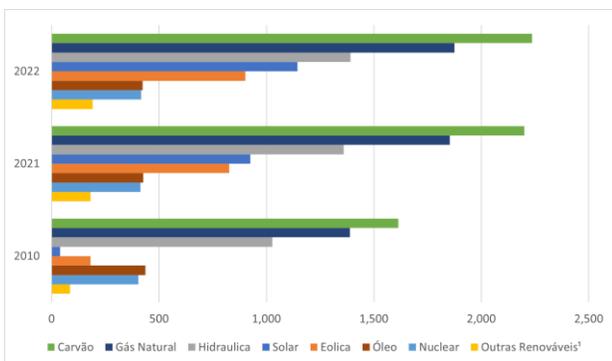


Fig. 2. Capacidade Instalada de Geração de Energia Mundial (GW), elaborado pelo autor a partir de [4]

A. Carvão

A geração de energia a partir do carvão foi criada no final do século 18, com uso amplificado no começo do século 19 durante a Revolução Industrial, sendo que as principais jazidas de carvão se localizam nos Estados Unidos, Rússia e China

[19], [21].

A tecnologia de geração de energia por carvão envolve a queima de carvão para produzir calor em uma caldeira que é, então, utilizado transformar água em vapor que, sob alta pressão, faz girar uma turbina conectada a um gerador, convertendo a energia térmica em energia elétrica [20], [21].

Uma das principais vantagens desta tecnologia está no fato do carvão ser abundante e possuir um custo relativamente baixo se comparado às outras fontes de energia. Além disso, esse tipo de ativo pode operar continuamente, fornecendo uma fonte estável de energia – também conhecida como fonte despachável de energia convencional. Por outro lado, a queima do carvão libera grandes quantidades de CO₂, SO₂, NO_x e outros gases causadores do efeito estufa, sua mineração é danosa para o meio ambiente, apresentando risco de contaminação de água e destruição de habitats [20].

Em termos de reservas recuperáveis, estima-se que as reservas de carvão evoluíram de 900 TWano em 2009, para quase 1.010 TWano em 2022, principalmente devido a um grande aumento nas reservas identificadas na região Ásia-Pacífico [22].

B. Gás Natural

O uso do gás natural para geração de eletricidade começou a ganhar popularidade no século 20, especialmente após a Segunda Guerra Mundial, devido à abundância do gás natural e às vantagens ambientais em comparação com outros combustíveis fósseis como o carvão e o petróleo. O desenvolvimento de turbinas a gás eficientes nos anos 1940 e 1950 facilitou a utilização de gás natural para geração de eletricidade [21].

A tecnologia de geração de energia por gás natural envolve a utilização deste combustível fóssil para produzir eletricidade em usinas termelétricas. Esse processo pode ser realizado através de diferentes tecnologias, sendo as mais comuns as turbinas a gás e as plantas de ciclo combinado [21], [23], [24].

Uma das principais vantagens dessa tecnologia é a menor emissão de CO₂ se comparado à outras fonte de energia não renovável e convencional com o carvão e o petróleo. Além disso, esse tipo de tecnologia é altamente flexível e responde rapidamente às mudanças na demanda da eletricidade o que um grande aliado para suporte à expansão renovável intermitente. No mais, outro diferencial dessa fonte é a sua abundância ao redor de todo o mundo [23], [24] e atualmente é estimado que haja reservas recuperáveis de gás natural na ordem de 190 trilhões m³ ou o equivalente a 220 TWano [22].

Entre as desvantagens está o impacto ambiental causado uma vez que, embora em menor intensidade que das demais fontes, a queima do gás natural ainda contribui para as emissões de gases de efeito estufa. Além disso, a utilização do gás demanda a existência de infraestrutura de transporte (gasodutos) e usinas são custosas e complexas. Por último, uma grande desvantagem do gás está associado grande volatilidade dos preços, que são influenciados por fatores geopolíticos e de mercado.

C. Hidráulica

A tecnologia de geração de energia hidráulica, também

conhecida como energia hidrelétrica, aproveita a energia potencial da água em movimento para gerar eletricidade. É uma das formas mais antigas e mais amplamente utilizadas de geração de energia renovável no mundo, gerando mais do que todas as outras tecnologias renováveis combinadas em 2022 sendo uma das tecnologias reconhecidas como essenciais para prover confiabilidade sistêmica e suporte para uma maior expansão renovável intermitente [25].

A energia hidrelétrica é gerada através do uso de barragens ou represas, onde a água armazenada em um reservatório é liberada para fluir através de turbinas. A força da água em movimento gira as turbinas, que estão conectadas a geradores, convertendo a energia cinética da água em energia elétrica [21]. Existem diferentes tipos de usinas hidrelétricas:

- a. Usinas de Acumulação por Bombagem: Utilizam dois reservatórios em diferentes altitudes. A água é bombeada para o reservatório superior em períodos de baixa demanda e liberada para gerar eletricidade durante períodos de alta demanda.
- b. Usinas de Fio d'Água: Aproveitam o fluxo contínuo de um rio, sem a necessidade de grandes reservatórios.
- c. Usinas de Reservatório: Utilizam grandes reservatórios para armazenar água e geram eletricidade conforme necessário.

Essa tecnologia apresenta algumas vantagens como a produção de energia com baixa emissão de carbono, ser uma fonte com alta confiabilidade fornecendo energia de base estável e ajustável conforme a demanda e, em muitos casos, seus reservatórios podem ser utilizados para irrigação, controle de enchentes e fornecimento de água potável [21], [25].

Contudo, algumas desvantagens são os impactos ambientais causados durante a construção dos empreendimentos que pode causar a submersão de grandes áreas, deslocando comunidades e alterando ecossistemas, alto custo inicial de construção e dependência de condições naturais uma vez que sua produção depende do fluxo de água, que pode ser afetado por secas ou mudanças climáticas.

A capacidade instalada atual de energia hidrelétrica é de 1,33 TW [4], com uma geração elétrica anual estimada em 0,6 TWano [22]. Ademais, em termos de reservas recuperáveis desse insumo, dado o impacto ambiental cada vez mais questionável das usinas hidrelétricas, estima-se o potencial de apenas 3 TW por ano, ou 90 TW para o ciclo de 30 anos [22].

D. Solar

A tecnologia de geração de energia solar pode ser dividida principalmente em duas categorias: energia solar fotovoltaica (PV) e energia solar térmica. Na energia solar fotovoltaica as células solares fotovoltaicas convertem a luz solar diretamente em eletricidade por meio do efeito fotovoltaico. Quando os fótons da luz solar atingem uma célula solar, eles excitam os elétrons do material semicondutor (geralmente silício), criando um fluxo de corrente elétrica. Já a energia Solar térmica possui sistemas que capturam o calor do sol para aquecer um fluido (água ou outro líquido) que pode ser usado diretamente para aquecimento de água ou convertido em vapor para acionar

turbinas e gerar eletricidade [21], [26].

A categoria mais amplamente utilizada da fonte solar é a energia fotovoltaica que fechou o ano de 2022 com cerca de 1,14 TW de capacidade instalada no mundo [4]. Essa aplicação possui como vantagem sua característica de construção modular e, por necessitar ser instaladas em áreas sem cobertura vegetal, podem aproveitar áreas já desmatadas para seu desenvolvimento, diminuindo a degradação do meio ambiente. Painéis (ou placas) solares também podem ser instalados em telhados de casas, shoppings e estacionamentos na modalidade de geração descentralizada [26]. Por esse motivo, entre outros como a redução de seu custo, essa tecnologia foi a que liderou a expansão de geração renovável na última década [4] e ainda conta com um potencial reserva recuperável estimada em 8.300 TW para o ciclo dos próximos 30 anos, ou seja, cerca de 12 vezes a demanda primária global nesse período [22].

Contudo, uma grande desvantagem desta tecnologia é o fato de produzir energia apenas durante o dia, apresentando baixa flexibilidade o que traz grandes desafios operacionais para os operadores do sistema elétrico que precisam contar com o suporte de outras fontes flexíveis de energia (como gás natural e hidrelétricas) para atendimento da demanda de energia noturna.

E. Eólica

A tecnologia moderna de geração de energia eólica baseia-se em turbinas eólicas que convertem a energia cinética do vento em energia elétrica. Existem dois tipos principais de turbinas eólicas: de eixo horizontal e de eixo vertical, sendo as de eixo horizontal as mais comuns. Nas últimas décadas, a tecnologia de energia eólica tem se desenvolvido rapidamente. As turbinas eólicas modernas são mais eficientes, maiores e capazes de gerar significativamente mais energia do que as primeiras versões [21], [26].

A capacidade instalada global de energia eólica cresceu substancialmente, impulsionada por preocupações ambientais, políticas de incentivo e avanços tecnológicos, fechando o ano de 2022 com cerca de 902 GW de capacidade instalada [4]. Ademais, em termos de reservas recuperáveis desse insumo estima-se o valor de 1.500 TW para o ciclo dos próximos 30 anos, entre a exploração do formato onshore e offshore [22].

Essa tecnologia apresenta vantagens como ser uma energia renovável não emissora dos gases do efeito estufa, estando disponível em grande parte do mundo. Além disso, possuem baixo custos operacionais e versatilidade de instalação, podendo ser instaladas em áreas rurais, offshore (no mar) e em zonas urbanas ou rurais. Entre as desvantagens estão a intermitência natural, uma vez que depende da disponibilidade de ventos para produção de energia, impacto visual, sonoro e ambiental, custo inicial elevado (principalmente se comparado com a tecnologia solar), além de requerer grandes áreas de terreno para construção [26].

Além disso, assim como a fonte solar, uma grande desvantagem desta tecnologia é de ser intermitente e não controlar sua geração o que se traduz em baixa flexibilidade o que traz grandes desafios operacionais para os operadores do sistema elétrico que precisam contar com o suporte de outras

fontes flexíveis de energia (como gás natural e hidrelétricas) para atendimento da demanda de energia em tempo real.

F. Óleo

A geração de energia a partir de óleo refere-se ao uso de combustíveis derivados do petróleo, como diesel, óleo combustível e gasolina, para produzir eletricidade em usinas termelétricas. Essas usinas queimam o óleo para gerar calor, que é então convertido em energia elétrica através de turbinas a vapor ou motores de combustão interna.

Entre as vantagens dessa tecnologia está a alta densidade energética, o que significa que uma pequena quantidade de combustível pode gerar uma grande quantidade de energia. Além disso, muitos países já possuem infraestrutura estabelecida para produção, armazenamento e distribuição de combustíveis líquidos, facilitando a implementação de usinas termelétricas a óleo. Por último, assim como as usinas hidrelétricas e a gás natural, as usinas termelétricas a óleo podem ser instaladas rapidamente e fornecer eletricidade de forma contínua, independentemente das condições climáticas, fornecendo alta confiabilidade e flexibilidade aos sistemas elétricos.

Por outro lado, essa tecnologia apresenta como desvantagens emissões significativas de dióxido de enxofre (SO₂), óxidos de nitrogênio (NO_x) e partículas, contribuindo para a poluição do ar e o aquecimento global. Ademais, muitos países precisam importar petróleo para suas necessidades energéticas, o que pode torná-los vulneráveis a flutuações de preços e interrupções no fornecimento, além do fato do preço do petróleo pode ser volátil, afetando os custos de produção de eletricidade e a competitividade econômica das usinas termelétricas a óleo [21].

A energia a óleo é uma fonte de energia amplamente utilizada em muitas partes do mundo devido à sua disponibilidade e facilidade de uso, contando com uma reserva recuperável estimada de 340 TWano [22]. Contudo, dada suas desvantagens ambientais e econômicas têm levado ao aumento do interesse por fontes de energia mais limpas e sustentáveis, como as renováveis e a nuclear.

G. Nuclear

A energia nuclear é produzida através do processo de fissão nuclear, onde átomos de urânio são bombardeados por nêutrons, resultando na liberação de calor. Esse calor é então usado para gerar vapor, que aciona turbinas conectadas a geradores elétricos, produzindo eletricidade [21].

Entre as vantagens desta tecnologia está o fato dela não gerar emissões significativas de gases de efeito estufa durante a operação, produzir grandes quantidades de eletricidade de forma contínua e confiável, o que reduz a dependência de combustíveis fósseis importados, além de apresentar um baixo custo de combustível já que o urânio é relativamente barato em comparação com combustíveis fósseis [27].

Entre as desvantagens está o alto impacto causado em caso de acidentes nucleares, que podem ter consequências severas para a saúde humana e o meio ambiente, como foi o caso de Chernobyl e Fukushima. Ademais, por produz resíduos radioativos de longa vida, requerem armazenamento seguro por

milhares de anos, ainda, possuindo um alto custo de construção [27].

Apesar da energia nuclear continuar sendo uma fonte controversa devido aos riscos associados, também é reconhecida por sua capacidade de fornecer energia elétrica de forma confiável e com baixas emissões de carbono, contribuindo para a diversificação da matriz energética global [27] e apresentando uma reserva recuperável estimada de 170 TWano [22].

V. ESTUDO DE CASO: O PLANEJAMENTO DA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA DA ALEMANHA

O termo "Energiewende" refere-se ao plano de transição energética da Alemanha, que envolve a mudança do país de uma matriz energética baseada em combustíveis fósseis e energia nuclear para uma baseada em fontes renováveis e sustentáveis, sendo um de seus marcos mais importantes a decisão tomada pelo governo alemão em 2011 de acelerar o fechamento das usinas nucleares do país até 2022, após o acidente nuclear de Fukushima no Japão. Essa decisão foi um passo significativo na política de energia do país e impulsionou ainda mais a transição para fontes de energia renováveis [28].

Tendo em vista que o gás natural emite menos CO₂ do que o petróleo mineral e o carvão, essa insumo foi o escolhido pelo governo Alemão para apoiar no processo de transição no curto e médio prazo. Em 2017, o gás natural cobriu 23,8% do consumo primário de energia na Alemanha, sendo utilizado principalmente para aquecimento. Como os recursos domésticos de gás natural na Alemanha são muito limitados, mais de 90% do gás natural consumido era, até então, importado da Rússia, Noruega e Países Baixos via gasoduto, de modo que a Alemanha dependia altamente de um fornecimento confiável de gás natural por parte desses países, considerando aspectos técnicos, econômicos e políticos, destacando questões de segurança energética [28].

E essas questões de segurança energética vieram especialmente à tona após o recente conflito entre Rússia e Ucrânia, onde boa parte do gás natural fornecido por este primeiro país foi interrompido causando um cenário de altos preços no país alemão.

Para compensar esse cenário, a Alemanha manteve o suprimento energético de seu país por meio de geração à carvão e, simultaneamente, na ventosa costa do Mar do Norte da Alemanha, engenheiros concluíram em tempo recorde a construção do primeiro terminal de importação de gás natural liquefeito (GNL), insumo que passou a ser importado dos Estados Unidos, Noruega e Emirados Árabes Unidos. O país ainda está construindo mais cinco terminais de GNL, com a maioria prevista para conclusão em até 2 anos. No entanto, o custo mais significativo da estratégia de Berlim para reduzir sua dependência do gás russo é financeiro já que esses seis terminais de GNL obrigaram o governo alemão a desembolsar cerca de US\$ 6,3 bilhões, mais que o dobro do inicialmente orçado.

Como mencionado anteriormente, um planejamento energético seguro e sustentável exige uma análise multifatorial

abrangente que englobe a avaliação de recursos disponíveis, reservas energéticas, demandas futuras, além de considerar os impactos ambientais, econômicos e políticos a longo prazo. A forte dependência de países estrangeiros para suprir necessidades energéticas essenciais pode deixar as nações expostas a riscos significativos, resultando em impactos econômico-sociais adversos. Este é um fator de extrema importância que requer monitoramento constante e estratégias eficazes de redução de vulnerabilidades.

VI. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O planejamento energético eficaz requer uma análise cuidadosa da disponibilidade de reservas e recursos, além de considerar detalhadamente a demanda energética local e os diversos impactos ambientais, sociais e econômicos associados à exploração e utilização das diferentes fontes de energia. Estratégias que priorizem a eficiência energética, a diversificação da matriz energética e a transição para fontes renováveis podem contribuir significativamente para mitigar os desafios relacionados às reservas e recursos energéticos.

É crucial reconhecer que a disponibilidade energética varia de acordo com cada região geográfica, assim como as necessidades energéticas específicas. Portanto, o caminho rumo à descarbonização e ao cumprimento das metas do Acordo de Paris será único para cada nação, não havendo uma abordagem universal aplicável.

Existem diversas tecnologias viáveis para estabelecer um plano de descarbonização da matriz elétrica global. No entanto, devido às características intermitentes das fontes renováveis, como solar e eólica, não é viável, com as tecnologias atualmente disponíveis, depender exclusivamente delas durante este processo. Fontes convencionais e flexíveis, como gás natural, carvão e nuclear, ainda desempenharão um papel crucial como combustíveis de transição nesse contexto.

Ademais, um planejamento energético seguro e sustentável exige uma análise abrangente dos recursos, reservas, demandas futuras e impactos a longo prazo. A dependência de países estrangeiros para suprir necessidades energéticas pode expor nações a riscos significativos, resultando em impactos econômico-sociais adversos, o que requer monitoramento constante e estratégias eficazes para reduzir vulnerabilidades.

VII. REFERÊNCIAS

- [1] H. Blanco, A. Faaij, A review at the role of storage in energy systems with a focus on Power to Gas and long-term storage, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 81 (2018) 1049e1086. ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.07.062>.
- [2] UNFCCC, Adoption of the Paris Agreement, 2015. Acesso em 29 de maio de 2024, <https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/109.pdf>.
- [3] D. Laslett, C. Carter, C. Creagh, P. Jennings, A large-scale renewable electricity supply system by 2030: solar, wind, energy efficiency, storage and inertia for the South West Interconnected System (SWIS) in Western Australia, *Renew. Energy* 113 (2017) 713e731. ISSN 0960-1481, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.06.023>, acesso em 29 de maio de 2024.
- [4] International Energy Agency. World Energy Outlook 2023, disponível em <https://iea.blob.core.windows.net/assets/86ede39e-4436-42d7-ba2a-edf61467e070/WorldEnergyOutlook2023.pdf>
- [5] MÜLLER, C. et al. Integrated Planning and Evaluation of Multi-Modal Energy Systems for Decarbonization of Germany. *Energy Procedia*,

- [S.L.], v. 158, p. 3482-3487, fev. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.923>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610219309671>. Acesso em: 13 jun. 2024.
- [6] ELSHURAF, Amro M.; FARAG, Hind M.; HOBBS, David A.. Blind spots in energy transition policy: case studies from germany and usa. *Energy Reports*, [S.L.], v. 5, p. 20-28, nov. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypr.2018.11.001>.
- [7] ØSTERGAARD, Poul Alberg; SPERLING, Karl. Towards Sustainable Energy Planning and Management. *International Journal Of Sustainable Energy Planning And Management*, [S.L.], v. 012014, n. -, p. 1-6, 6 maio 2014. *International Journal of Sustainable Energy Planning and Management*. <http://dx.doi.org/10.5278/IJSEPM.2014.1.1>.
- [8] DOBRAVEC, Viktorija; MATAK, Nikola; SAKULIN, Christian; KRAJAČIĆ, Goran. Multilevel governance energy planning and policy: a view on local energy initiatives. *Energy, Sustainability And Society*, [S.L.], v. 11, n. 1, p. 1-17, 6 jan. 2021. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1186/s13705-020-00277-y>.
- [9] POHEKAR, S.D.; RAMACHANDRAN, M.. Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning—A review. *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, [S.L.], v. 8, n. 4, p. 365-381, ago. 2004. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2003.12.007>.
- [10] BAUMGÄRTNER, Nils; DEUTZ, Sarah; REINERT, Christiane; NOLZEN, Niklas; KUEPPER, Lucas Elias; HENNEN, Maike; HOLLERMANN, Dinah Elena; BARDOW, André. Life-Cycle Assessment of Sector-Coupled National Energy Systems: environmental impacts of electricity, heat, and transportation in ermany till 2050. *Frontiers In Energy Research*, [S.L.], v. 99, n. 4, p. 1-13, 8 abr. 2021. Frontiers Media SA. <http://dx.doi.org/10.3389/fenrg.2021.621502>.
- [11] World Energy Council. (2016). "World Energy Resources." Disponível em: World Energy Council
- [12] Society of Petroleum Engineers. (2007). "Petroleum Resources Management System." Disponível em: SPE
- [13] SZABÓ, S.; BÓDIS, K.; HULD, T.; MONER-GIRONA, M.. Sustainable energy planning: leapfrogging the energy poverty gap in africa. *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, [S.L.], v. 28, p. 500-509, dez. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.044>.
- [14] World Commission on Environment and Development (WCED) (1987), *Our Common Future*, Oxford University Press, Oxford
- [15] Köne, A.Ç., Büke, T. (2007), An Analytical Network Process (ANP) Evaluation of Alternative Fuels for Electricity Generation in Turkey, *Energy Policy*, 35, 5220-5228.
- [16] DEMIRTAS, Ozgur. Evaluating the Best Renewable Energy Technology for Sustainable Energy Planning. *International Journal Of Energy Economics And Policy*. S.L., p. 23-33. ago. 2013.
- [17] KAYA, Tolga; KAHRAMAN, Cengiz. Multicriteria renewable energy planning using an integrated fuzzy VIKOR & AHP methodology: the case of istanbul. *Energy*, [S.L.], v. 35, n. 6, p. 2517-2527, jun. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2010.02.051>.
- [18] DIAKOULAKI, Danae; ANTUNES, Carlos Henggeler; MARTINS, António Gomes. MCDA and Energy Planning. *International Series In Operations Research & Management Science*, [S.L.], p. 859-890, jan. 2005. Springer-Verlag. http://dx.doi.org/10.1007/0-387-23081-5_21.
- [19] International Energy Agency (IEA). "Coal 2020 – Analysis and Forecasts to 2025." IEA.
- [20] National Coal Mining Museum for England. (s.d.). "Coal and the Industrial Revolution". National Coal Mining Museum for England. Disponível em: <https://www.ncm.org.uk/learning/coal-and-the-industrial-revolution>.
- [21] Empresa de Pesquisa Energética (EPE) - <https://www.epe.gov.br/pt/abcedenergia/fontes-de-energia>
- [22] PEREZ, Marc; PEREZ, Richard. Update 2022 – A fundamental look at supply side energy reserves for the planet. *Solar Energy Advances*, [S.L.], v. 2, p. 100014, 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.seja.2022.100014>.
- [23] U.S. Energy Information Administration (EIA). "Natural Gas Explained". Disponível em: <https://www.eia.gov/energyexplained/natural-gas/>
- [24] U.S. Energy Information Administration (EIA). "The Role of Gas in Today's Energy Transitions". Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/cc35f20f-7a94-44dc-a750-41c117517e93/TheRoleofGas.pdf>

- [25] U.S. Energy Information Administration (EIA). “Hydroelectricity”, disponível em: <https://www.iea.org/energy-system/renewables/hydroelectricity>
- [26] WIDELL, John et al. Renewable Energy Resources. 2. ed. Nova York: Taylor & Francis, 2006. 625 p.
- [27] U.S. Energy Information Administration (EIA). “Nuclear Power and Secure Energy Transitions”, disponível em: <https://www.iea.org/reports/nuclear-power-and-secure-energy-transitions>
- [28] GILLESSEN, B.; HEINRICHS, H.; HAKE, J.-F.; ALLELEIN, H.-J.. Energy security in context of transforming energy systems: a case study for natural gas transport in germany. Energy Procedia, [S.L.], v. 158, p. 3339-3345, fev. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.966>.
- [29] BBC NEWS: Guerra na Ucrânia: como Alemanha deixou de depender de gás russo em poucos meses. Alemanha, 28 nov. 2022. Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/internacional-63769249>. Acesso em: 11 jun. 2024.

VIII. BIOGRAFIAS



Mayra Lucy Guimarães Castro de Santana é graduada em engenharia elétrica e sistemas de potência pela Universidade Presbiteriana Mackenzie, possui especialização em Energia Renováveis, Eficiência Energética e Geração Distribuída pela Universidade de São Paulo (USP) e Master of Business Administration pela Universidade de São Paulo (USP). Sua experiência profissional é focada na atuação no mercado de energia elétrico brasileiro, em especial regulação e estudos de mercado e preço de energia, com passagens pelo Grupo Solvi, Grupo Comerc e Grupo São Martinho. Atualmente é diretora de Regulação e Estudos de Mercado na Thymos Energia, consultoria especializada em energia e mestrande de sistemas de potência no Grupo de Energia do Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Miguel Edgar Morales Udaeta é pesquisador do Grupo de Energia do Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Vanessa Meloni Massara é pesquisadora do Grupo de Energia do Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Viviane Nascimento é pesquisadora do Grupo de Energia do Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.