



MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA
SECRETARIA DE PLANEJAMENTO E DESENVOLVIMENTO ENERGÉTICO



PNE 2050

PLANO NACIONAL DE ENERGIA



VERSÃO PARA
CONSULTA PÚBLICA



MINISTÉRIO DE
MINAS E ENERGIA



Tecnologias Disruptivas

As tecnologias disruptivas são aqui definidas como aquelas capazes de alterar significativamente o mercado de energia, mas para o qual temos poucos elementos para antever sua inserção na matriz energética e os desdobramentos decorrentes. São listadas aqui as que despontam como potencialmente disruptivas no horizonte do PNE 2050: hidrogênio, etanol lignocelulósico ou de 2ª geração, biorrefinaria, energia dos oceanos, *small modular reactor* (SMR), fusão nuclear, geotermia, navio plataforma e transmissão sem fio.

Hidrogênio

Atualmente, o hidrogênio é aplicado como matéria prima na síntese de diversos produtos e em processos industriais. O uso energético do hidrogênio é conhecido há bastante tempo; pesquisas e desenvolvimento de tecnologias de células combustíveis têm sido desenvolvidas com o objetivo de viabilizar a sua utilização para a produção de eletricidade e no setor de transportes.

Do mesmo modo que a eletricidade, o hidrogênio pode ser considerado um modo eficiente de armazenar e transportar energia, ou seja, um transportador de energia. As principais formas de obtenção de hidrogênio são: a reforma a vapor, a oxidação parcial ou reforma autotérmica de gás natural ou óleos, a gaseificação de carvão ou biomassa; e a eletrólise da água.

Por conta de suas potenciais aplicações, o hidrogênio pode ajudar a superar alguns desafios energéticos, tais como: descarbonização de setores de difícil redução de emissões, armazenamento para renováveis, segurança de abastecimento por conta da versatilidade de produção (a partir de fontes renováveis e não renováveis) e diversidade de aplicação (direta ou convertida em eletricidade ou outros produtos de interesse comercial – *Power-to-X*).

Em alguns setores, o hidrogênio e os combustíveis à base de hidrogênio podem ser uma das alternativas disponíveis para a transição para uma economia de baixo carbono: para veículos leves, a prioridade é reduzir o custo da célula a combustível e questões relacionadas com o armazenamento de hidrogênio a bordo (peso e segurança, por exemplo). Isso poderia torná-los competitivos com veículos elétricos e potencialmente atraentes para consumidores que priorizam a autonomia (distâncias de 400 a 500 km). Para veículos pesados, a prioridade é reduzir o preço do hidrogênio. Além disso, no caso do biogás e biometano, uma alternativa seria desenvolver novos usos em aplicações industriais, via produção de hidrogênio e gás de síntese, alternativas que podem ser atraentes, no futuro, nos transportes. Ressalta-se que a precificação de carbono pode auxiliar no processo de aumento de competitividade dessa fonte.

Por se tratar do aproveitamento de uma nova fonte toda a cadeia apresenta desafios, principalmente os relacionados ao custo do desenvolvimento da tecnologia e à instalação da infraestrutura necessária. Por exemplo, caso não seja viável a produção local de hidrogênio, o transporte em longas distâncias é um desafio, devido à sua baixa densidade energética volumétrica. Adicionalmente, há necessidade de instalação de estações de abastecimento para a utilização em veículos movidos à célula a combustível.

Diversos países vêm implementando políticas e direcionando investimentos para o desenvolvimento do hidrogênio. Dentre eles destacam-se os Estados Unidos com meta fabricar 1 milhão de veículos à célula combustível em 2030, do mesmo modo que a China, e instalar mil estações de abastecimento. De mesmo modo, o Japão anunciou a meta de construir 80 estações de abastecimento até 2021. O Reino Unido iniciou testes de mistura de 20% de hidrogênio na malha de gás natural. Já o Brasil incluiu o hidrogênio no Plano de Ciência, Tecnologia e Inovação para Renováveis e Biocombustíveis em 2018-2022, com vistas a fomentar a pesquisa, o desenvolvimento tecnológico e a inovação nas cadeias produtivas de energia e, como resultado, fortalecer a competitividade e aumentar a diversificação da matriz energética, garantindo segurança e eficiência energética. Nesse sentido, o plano indica ações para a utilização da energia do hidrogênio, principalmente para uso veicular e estacionário para geração de energia e para a produção de combustíveis. A IEA considera que apesar do bom impulso recente, mais esforços são necessários para maior expansão do hidrogênio na matriz energética, em pelo menos três áreas: aumento da parcela de hidrogênio em usos industriais correntes, expansão do hidrogênio em novas aplicações e reduções de custo de transporte.

Perspectivas Tecnológicas

A principal rota de produção de hidrogênio é via reforma a vapor de gás natural (conhecido como hidrogênio cinza) que é a mais barata, mas emite GEE. Ao incluir a tecnologia de captura e uso de carbono (CCUS) pode-se chegar a uma alternativa mais limpa (hidrogênio azul). Entretanto, o custo adicional do CCUS acarreta menor competitividade.

Adicionalmente, o hidrogênio pode ser obtido a partir de fontes renováveis via eletrólise (hidrogênio verde). Essa é a rota mais limpa de todas que extraem hidrogênio de alguma fonte primária, mas enfrenta o desafio dos altos custos da eletrólise alcalina e membranas de troca de próton (PEM), que tem se mostrado mais promissora recentemente, além da influência do preço da energia renovável. No tocante à produção primária, existe o desafio de ampliar o domínio tecnológico sobre a rota de biohidrogênio e do aproveitamento da oferta natural de hidrogênio em crateras terrestres, ofiolito ou em montanhas oceânicas. As ferramentas para identificar as reservas são similares às utilizadas para a indústria de O&G e no Brasil já foram identificadas reservas em crateras no Ceará, Roraima, Tocantins e Minas Gerais. Entretanto, ainda são necessários maiores estudos para compreender o real potencial da obtenção do hidrogênio natural, como o tempo de vida do hidrogênio no reservatório, a estimativa de reserva, entre outros.

Desafios Principais

1. *Elaboração de normatização para uso, transporte e armazenamento do hidrogênio*

A inserção do hidrogênio envolve a elaboração de padrões e regulação das atividades e usos. Especialmente sob os aspectos de segurança, pois este possui alta inflamabilidade, além de possuir moléculas de tamanho reduzido, podendo ocorrer a difusão em diversos materiais. Outro aspecto relaciona-se a seu transporte, já que, por conta de sua baixa densidade energética volumétrica, o transporte em longas distâncias passa a ser um desafio. Por fim, o hidrogênio pode ser armazenado, sendo o método mais interessante para longo prazo o armazenamento geológico e a compressão para armazenamento comercial.

Recomendações

1. *Desenhar aprimoramentos regulatórios relacionados à qualidade, segurança, infraestrutura de transporte, armazenamento e abastecimento.*

Imperioso avaliar por meio de estudos as barreiras ligadas à infraestrutura de transporte, armazenamento e abastecimento com o objetivo de definir os aprimoramentos regulatórios necessários, como, por exemplo, a regulação da mistura do hidrogênio com gás natural na malha de gás natural o que minimizaria a necessidade de construção de infraestrutura e custos associados. As questões associadas ao armazenamento geológico do hidrogênio podem ser resolvidas no âmbito da definição do arcabouço regulatório para a estocagem de gás natural. Ademais, é necessário investir na requerida normatização (normas, códigos e padrões) para a introdução do hidrogênio no mercado consumidor, baseada nas melhores práticas internacionais. Nesse sentido, deve-se considerar os aspectos importantes de medição, da padronização dos equipamentos de reabastecimento, dos veículos de qualidade da mistura entre gás natural e hidrogênio, além de normas de segurança, devido ao alto grau de inflamabilidade do hidrogênio.

2. *Articular com outras instituições internacionais que tenham iniciativas na área de hidrogênio.*

A IEA preconiza o aumento da cooperação internacional e entre setores como condição fundamental para assegurar uma inserção rápida do hidrogênio na matriz energética. Na questão internacional, as iniciativas entre países, via instituições ou agentes, podem ajudar a avançar na curva de aprendizagem e alavancar os benefícios de transbordamento de conhecimento na área.

Energia dos Oceanos

O Brasil tem um litoral com mais de 7.400 km. Sua população está concentrada perto do litoral, e além dos usos atuais dos recursos marítimos, cada trecho marítimo possui potencial energético bruto cuja viabilidade ainda não carece de novas medições.

A Energia dos Oceanos apresenta-se em diversas formas. Em estado bruto dispõe-se sob a forma de movimento periódico das marés, de movimento das ondas, hidrocínética – seja por corrente marinha ou fluxo de maré, energia térmica, e de gradiente salino.

O potencial estimado para a energia das ondas no Brasil precisa de atualizações. Coppe (2013) estimou potencial teórico nacional de 114 GW, considerando como energias primárias apenas a maremotriz e a ondomotricidade. As bacias atlânticas brasileiras são um potencial a estudar e mesmo a diferença de composição química entre rios pode também ser explorada. De acordo com IRENA (2014), a potência de geração anual de energia estimada é de 5.177 TWh.

Perspectivas Tecnológicas

A energia maremotriz é a que se encontra mais desenvolvida entre as formas de energia a partir dos oceanos. Centrais elétricas baseadas neste tipo de energia operam comercialmente com sucesso desde os anos 1960 na França, com a usina de La Rance, no Canadá com a usina de Annapolis (1984) e na Coreia do Sul com a usina de Sihwa Lake (2011).

As demais fontes são ainda incipientes: a energia mecânica das ondas ainda se encontra em estágio pré-comercial. No caso da energia hidrocínética, o potencial brasileiro ainda carece de maior conhecimento. Já no caso do aproveitamento da energia térmica dos oceanos, o potencial energético parece promissor, a partir de levantamento das temperaturas das águas superficiais da costa brasileira que indica aptidão para geração elétrica a partir dessa tecnologia. Por fim, em relação ao gradiente de salinidade trata-se de fonte ainda em estágio de desenvolvimento, com perspectiva de viabilidade técnica e econômica a partir da década de 2030, sendo relevante informar que há pesquisas no Brasil sobre o tema.

Estudos de custos de instalação, operação e manutenção desenvolvidos pela OES para Ondomotriz, hidrocínética de corrente de marés e conversão de energia térmica dos oceanos (OTEC) estimaram que os arranjos em nível comercial, década de 20, teriam CAPEX por tecnologia para fatores de capacidade de 35-40%:

- Ondas: variando em US\$ 2.700/kW a US\$ 9.100/kW;
- Maremotriz: de US\$ 3.300/kW a US\$5.600/kW;
- OTEC: de US\$ US\$ 7.000/kW a US\$13.000/kW.

Desafios Principais

1. *Necessidade de construção de um arcabouço legal e regulatório que remova barreiras para que a eólica offshore possa ser candidata para a expansão, com segurança jurídica.*

Assim como no caso de eólica offshore, a possível divergência sobre a abrangência da regulação brasileira às necessidades e exigências específicas para a instalação de centrais elétricas em ambiente marítimo; principalmente se considerado o fato de que a regulação, na época de sua discussão e desenvolvimento, não foi derivada de uma estratégia destinada a contemplar esses empreendimentos.

Recomendações

1. *Aprimorar o marco regulatório existente visando possibilitar a exploração do recurso.*

Assim como no caso da eólica offshore, são necessários aperfeiçoamentos à regulação existente para incorporar as especificidades relacionadas aos projetos em ambiente marinho.

Etanol Lignocelulósico ou de 2ª geração

O etanol de 2ª geração (E2G) é obtido a partir de material celulósico, oriundo do processamento de qualquer biomassa de origem vegetal como, por exemplo, resíduos de milho, casca de arroz, bagaço e palha da cana, dentre outros. No Brasil, a pesquisa para obtenção deste biocombustível se concentra predominantemente nos resíduos da produção sucroalcooleira (bagaço, palha e ponta), que se encontram armazenados ao lado ou a poucos quilômetros das fábricas e em grande quantidade. Seu rendimento é mais que o dobro do que o E1G.

A implementação mundial da produção comercial do etanol lignocelulósico segue em ritmo lento. No Brasil, as plantas comerciais enfrentaram desafios técnicos quanto à resistência metal-mecânica na etapa de pré-tratamento e à adaptabilidade das leveduras. Apesar de terem realizado ajustes em seus processos e solucionados tais problemas, ainda funcionam abaixo da capacidade nominal.

Nesse sentido, as pesquisas sobre esta tecnologia ainda precisam avançar sobre a eficiência da fermentação das pentoses para produção em escala comercial, o que possibilitará o aumento dos volumes ofertados e a redução dos custos, bem como a diminuição dos resíduos. O setor deve ampliar a articulação entre os agentes públicos e privados, onde se incluem os centros de pesquisas e universidades para impulsionar o desenvolvimento desta tecnologia, em âmbito nacional e internacional.

Além disso, a integração com a produção do etanol de primeira geração poderá facilitar a viabilidade econômica do E2G no Brasil, devido ao compartilhamento de equipamentos. A disputa pela biomassa da cana com geração termoelétrica em unidades produtoras de etanol de cana convencional (cogeração) é um obstáculo para a introdução do E2G. Para as usinas que já implantaram a cogeração de alta eficiência, será necessário realizar outros arranjos, de forma a possibilitar sua introdução. Soluções passam pela utilização da palha e da ponta disponível e/ou da cana energia (variedade de cana com maior teor de fibra por hectare), as quais requerem a elaboração de estudos de viabilidade econômica, devido aos custos adicionais com equipamentos para colheita e processamento.

Biorrefinaria

Diversas inovações tecnológicas em biotecnologia poderão gerar uma revolução no setor de biocombustíveis e de bioprodutos, ampliando as aplicações de economia circular. Neste contexto, é oportuno ressaltar o papel das biorrefinarias, que integram processos de conversão de biomassa em biocombustíveis, insumos químicos, materiais, alimentos, rações e energia.

O desenvolvimento e a disseminação de biorrefinarias mostra-se como solução para otimizar o uso de recursos e minimizar os resíduos e fazem parte da agenda de PD&I da maioria dos países desenvolvidos e também do Brasil.

Navio Plataforma

A oferta de GNL proveniente de navios-plataforma (Floating LNG - FLNG) poderá se tornar cada vez mais frequente, complementando a produção dos terminais terrestres. Trata-se da construção de navios já adaptados para processar e liquefazer o gás natural e armazenar o GNL. Essa nova tecnologia pode permitir a produção em campos descobertos longe da costa, em campos menores, entre outros.

Small Modular Reactors (SMR)

As preocupações de segurança associadas ao alto custo de construção de grandes centrais nucleares elevaram o interesse no desenvolvimento tecnológico de uma nova geração de reatores mais seguros e de menor custo. Parte dos *Advanced nuclear reactors* classificados como sistemas de Geração IV se fundamentam em projetos menores e de menor custo que os reatores atuais - são os chamados Small Modular Reactors (SMRs) cuja potência vai até 300MW. Além de protótipos refrigerados a água, diversos modelos apresentam sistemas de refrigeração a gás, metais líquidos ou sais fundidos podendo alcançar temperaturas superiores aos reatores atuais (Arostegui, D. A. & Holt, M. 2019).

Os SMRs devem adotar o ciclo de combustível fechado e incorporar sistemas de segurança passivos já parcialmente adotados nos atuais reatores de Geração III e III+. Estes sistemas utilizam forças naturais como gravidade e diferença de pressão para acionamento dos mecanismos de resfriamento do núcleo sem necessidade de intervenção humana ou energia elétrica. Embora a maioria dos modelos ainda esteja em fase de desenvolvimento há expectativa de que reatores avançados de geração IV já estejam comercialmente disponíveis na década de 2030 (MIT, 2018).

Fusão Nuclear

A fusão nuclear é uma tecnologia com a perspectiva de oferecer uma geração elétrica de base, com emissões de GEE praticamente nulas e sem a possibilidade de acidentes com desdobramentos significativos fora da área da usina.

Embora seja uma tecnologia promissora no longo prazo, ainda requer muitos esforços de P&D ao longo das próximas décadas. Dessa forma, reatores com a tecnologia de fusão nuclear não devem estar disponíveis para contribuir para a geração de energia na primeira metade do século XXI, por conta dos desafios a serem enfrentados (IEA & NEA, 2015).

Geotermia Superficial

A geotermia superficial é o aproveitamento de energia térmica do subsolo superficial, usando o ciclo de refrigeração. Essa tecnologia é utilizada em edificações e indústrias, havendo mais de 3 milhões de plantas funcionando em 54 países do mundo e 73 GW instalados para produção de calor em 2019 (Lund, 2019). É utilizada principalmente para aquecer, climatizar e desumidificar ambientes; aquecer água em banheiros e piscinas; e aquecer e resfriar processos industriais. Os líderes da tecnologia são a China, os Estados Unidos e a Europa.

Sua utilização reduz o consumo de energia final para produção de energia térmica, acima de 60% para aquecimento e entre 20% e 60% para resfriamento, o que pode acarretar diminuição do consumo de energia elétrica nos horários de pico.

Como externalidades locais é possível reduzir o stress hídrico, ao substituir torres de resfriamento, os efeitos da ilha de calor urbana, ao ser utilizada para climatização, aplicação em que também contribui para minimizar os impactos sonoro e visuais.

A situação internacional indica que a tecnologia já dispõe de viabilidade para alguns mercados, fundamentada nos conceitos de eficiência energética, o que pode representar uma oportunidade para o Brasil.

Transmissão de Energia Elétrica sem fio (*Wireless Transmission*)

Basicamente, há duas possibilidades para transmissão de energia elétrica sem fio, feita de um terminal transmissor para um receptor:

- Por acoplamento capacitivo ou por indução eletromagnética (similar a um transformador de potência). Os terminais transmissor e o receptor precisam estar muito próximos entre si, pois a eficiência da transmissão decai exponencialmente com a distância entre eles.
- Por radiação eletromagnética. Nesse caso, a radiação pode ocorrer por ondas de rádio/micro-ondas, em que a energia é transformada em ondas e transmitida/recebida por meio de antenas, ou por laser, em que a energia é transformada e transmitida na forma de luz, sendo convertida novamente em energia no lado receptor a partir de células fotovoltaicas.

A maior parte dos avanços está concentrada em carregamento sem fio de aparelhos elétricos a curtas distâncias ainda com perdas na transmissão consideráveis. A radiação a longa distância, baseada em radiação eletromagnética, ainda está em desenvolvimento.