

UM ESTUDO SOBRE COMBUSTÍVEIS PARA AVIAÇÃO: HIDROGÊNIO E CÉLULA A COMBUSTÍVEL

Ricardo de Brito¹

Jairo Afonso Henkes²

RESUMO

Há eminente necessidade de novas fontes de energia no mundo todo em diversas áreas de atuação, seja no setor habitacional, industrial, desde grandes empresas até um mero cidadão comum em sua residência. Na aviação, é mais do que conhecida a preocupação com a poluição e também com o suprimento de fontes energéticas, seja dos órgãos regulatórios, de políticas de desenvolvimento, de proteção ao meio ambiente e das próprias companhias aéreas. A principal fonte usada hoje, combustível fóssil, é conhecido com uma fonte poluidora e esgotável, então o futuro está voltado para algo renovável e se possível menos poluente. Sabe-se também que já existem várias alternativas e este trabalho com caráter exploratório por meio de pesquisas bibliográficas procurará descrever o estado da arte neste setor e perspectivas de futuro. São conhecidas e estão sendo pesquisadas e desenvolvidas outras fontes de energia, que poderiam ser utilizadas, porém ainda em busca de alinhar seu uso. Especialmente na aviação setor que exige um alto nível de confiabilidade, pois é desenvolvida em uma grande área geográfica, o que torna mais desafiador alcançar um desempenho seguro, econômico e ambientalmente sustentável para os novos combustíveis.

ISSN 2763-7697

Palavras-chave: Hidrogênio; eletrólise; célula a combustível; aviação civil.

¹ Piloto comercial e instrutor de voo (VOE FLORIPA, 2018). Piloto de Planador e instrutor de voo (ACBB, 2019). Graduando em Ciências Aeronáuticas (AEROTD, 2022). Piloto executivo de empresa privada, aeronave a reação de classe B. E-mail: rscsbara@gmail.com

² Mestre em Agroecossistemas (UFSC, 2006). Especialista em Administração Rural (UNOESC, 1997). Engenheiro Agrônomo (UDESC, 1986). Professor e Pesquisador nas Áreas de Gestão Ambiental, Ciências Aeronáuticas, Agronomia, Administração e Engenharia Ambiental. AEROTD. <https://orcid.org/0000-0002-3762-471X>. E-mail: jairohenkes333@gmail.com

A STUDY ON AVIATION FUELS: HYDROGEN AND FUEL CELLS

ABSTRACT

There is an eminent demand for new energy sources around the world in several areas of activity, whether in the housing or industrial sectors, from large companies to a mere ordinary citizen at home. In aviation, the concern with pollution and with the supply of energy sources is more than known, whether from regulatory bodies, development policies, environmental protection and the airlines companies. The main source used today, fossil fuel, is known as a polluting and exhaustible source, so the future is focused on something renewable and if possible less polluting. It is also known that there are already several alternatives and this work with an exploratory character through bibliographic research will seek to describe the state of the art in this sector and prospects for the future. Other energy sources are known and are being researched and developed, which could be used, but still seeking to align their use. Especially in the aviation sector that demands a high level of reliability as it is developed over a large geographic area, which makes it more challenging to achieve safe, economical and environmentally sustainable performance for new fuels.

Keywords: *Hydrogen; electrolysis; fuel cell; civil aviation.*

1 INTRODUÇÃO

Levando-se em conta as ações e políticas públicas, se identifica uma real e atual preocupação com o tema. O Bioquerosene e hidrocarbonetos renováveis estão sendo desenvolvidos como alternativas de combustível, pois tais tecnologias e pesquisas contribuem para uma possível melhoria no setor aeronáutico (MADSEN; HENKES, 2021).

São diversas as fontes energéticas possíveis no mundo, que acabam se tornando economias à medida que são exploradas. O Hidrogênio tem um futuro ainda incerto, no entanto especialistas afirmam que não há como evitar essa forma de produção de energia em grande escala no futuro próximo (SCHNEIDER, 2007).

O conceito de um novo dispositivo de energia chamado célula a combustível está atraindo cada vez mais a atenção do público em geral, que não é mais apenas um tópico da comunidade técnica, científica e comercial. Este conceito sempre esteve associado a crescentes preocupações com a proteção ambiental, aviões elétricos ecológicos e geração descentralizada de energia eficiente. No entanto, o conceito de células a combustível é muito mais amplo e faz parte da chamada "economia do hidrogênio" (LINARDI, 2008).

Considerando que os recursos fósseis são finitos, os preços aumentarão de forma gradual e segura, seu consumo é ineficiente do ponto de vista energético, sua localização de armazenamento gera conflitos políticos e, por último, mas não menos importante, esses combustíveis cuja combustão produz emissões prejudiciais ao meio ambiente.

O hidrogênio seria uma fonte energética alternativa e com potencial de se tornar um dos combustíveis para a aviação civil? Estudiosos do assunto consideram o hidrogênio como uma promissora e eficiente alternativa energética, vislumbrando uma nova "economia do hidrogênio". Estima-se que até a década de 2080, 90% da energia venha do hidrogênio (MARCHETTI, 1990).

Este artigo tem o objetivo de descrever o potencial energético e processo de captação do hidrogênio pela eletrólise da água e a aplicação do hidrogênio na aviação civil. Com objetivos específicos descrever o funcionamento de células a combustível e o desenvolvimento brasileiro na tecnologia de hidrogênio.

2 REFERENCIAL TEÓRICO OU REVISÃO DA LITERATURA

Apresenta-se neste estudo, o hidrogênio extraído pelo processo de eletrólise da água e a tecnologia de célula a combustível alimentada por hidrogênio.

2.1 O HIDROGÊNIO

Hidrogênio, é extremamente abundante no universo. Na Atmosfera, o hidrogênio existe quase inteiramente na forma de compostos que compõem cerca de 70% dos gases encontrados na Terra. Foi descoberto em 1776 pelo cientista britânico Henry Cavendish e ficou conhecido como: ar inflamável (RIFKIN, 2003). A pesquisa de hidrogênio se concentra na produção de eletricidade, calor e água limpa resultante com resíduo do processo usando células de combustível que convertem energia química em energia elétrica sem prejudicar o meio ambiente (SILVA, 2016).

São diversas as possibilidades de fontes energéticas conhecidas, no entanto a eficiência dentre elas varia, e considerando o hidrogênio sabe-se que:

O hidrogênio consegue conter a maior parte da energia química, térmica e/ou elétrica usada em sua produção, que pode ser recuperada quase completamente com os processos adequados. Comparando outras fontes energéticas, o hidrogênio tem a maior quantidade de energia por unidade de massa, ou seja, que é cerca de três vezes mais do que o combustível feito de petróleo. Ao mesmo tempo com preços não comerciais competitivos para grandes fins energéticos, com um baixo nível de segurança no processamento, armazenamento e transporte e por último, mas não menos importante, o desenvolvimento e preço das células a combustível, os dispositivos mais adequados para convertê-lo em energia elétrica e calor. Os problemas inerentes ao desenvolvimento da utilização do hidrogênio como portador de energia, embora significativos, não constituem dificuldades que possam ser superadas (LIBERATO NETO; MOREIRA, 2007, p. 1).

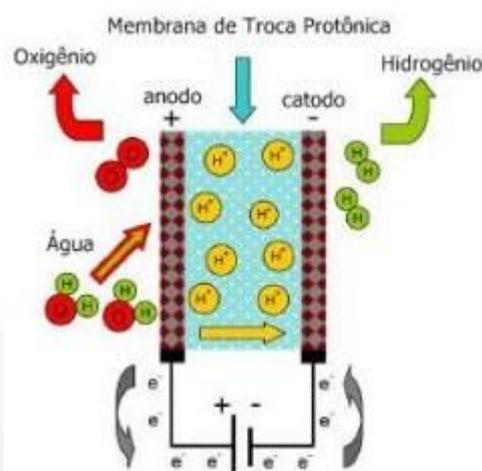
Mesmo ele estando presente em diversos locais na Atmosfera, é necessário um processo para extrai-lo de substâncias onde ele está presente, como a água (H₂O) e ou compostos orgânicos para obtenção do hidrogênio. Analisando este processamento e levando em consideração que todo esse processo requer fontes de energia para que possa ser executado, pode-se

classificá-lo como “GREEN” ou “BLACK”, respectivamente de fontes renováveis e não renováveis (AZEVEDO, 2020). Os estudos atuais na produção de hidrogênio afirmam que se pode reduzir as emissões globais de carbono. O potencial do hidrogênio representa verdadeira mudança na maneira de se obter energia para diferentes processos, em especial tratando-se de fontes de energias renováveis (ONU, 2019). O hidrogênio tem como desafio na sua produção em massa, usando fontes renováveis para alimentar esse processo, o baixo custo para ser viável a sua aplicação no mercado econômico (PAGLIARO, 2020).

2.1.1 Produção do hidrogênio pelo processo da eletrólise

Segundo Viola (2015) eletrólise é definida como uma reação química desencadeada por uma fonte de energia fora do sistema químico. O fornecimento de tensão e corrente ocorre entre os eletrodos do eletrólito, que são separados por um eletrólito com boa condutividade iônica, tal separação vem evoluindo implementando tipos de membranas mais eficientes como condutoras dos íons para melhorar o aproveitamento. O processo específico que quebra as moléculas de água em hidrogênio e oxigênio é chamado de eletrólise da água, conforme demonstrado na Figura 1, a seguir:

Figura 1 - Esquema do funcionamento de um eletrolisador



Fonte: Ursúa, Gandía e Sanchis, 2012.

Durante a eletrólise, isso resulta na liberação de uma mistura equilibrada de hidrogênio e oxigênio, uma mistura que possui alta capacidade de reação e produz uma alta temperatura de chama durante a combustão (LIBERATO NETO; MOREIRA, 2007). Certamente, converter hidrogênio em eletricidade com células a combustível não é prejudicial ao meio ambiente, pois os subprodutos são água e calor (BRAGA, 2010). Entretanto o processo da eletrólise utiliza eletricidade como insumo, tal que deve ser produzida de maneira limpa, a partir de energia eólica, solar, maremotriz e hidrelétrica entre outros.

Embora haja um rótulo renovável para fontes de energia eólica, solar e hidrelétrica, ainda há impactos ambientais na construção destas usinas de geração de elétricas que precisam ser considerados. Para quantificar esse dano, é utilizada uma metodologia padronizada pela *International Organization for Standardization* (ISO), conhecida como análise do ciclo de vida (ACV), onde as normas do ISO 14.040 e 14.044 determinam as diretrizes para os estudos de ACV (DEMIR; TASKIN, 2013).

A transição energética se mostra a caminho da descarbonização, sendo o hidrogênio proveniente de eletrólise talvez a melhor saída conhecida atualmente. Para que este objetivo seja atendido, o processo deve ser alimentado por fontes renováveis (AZEVEDO, 2020).

2.1.2 Funcionamento da célula a combustível

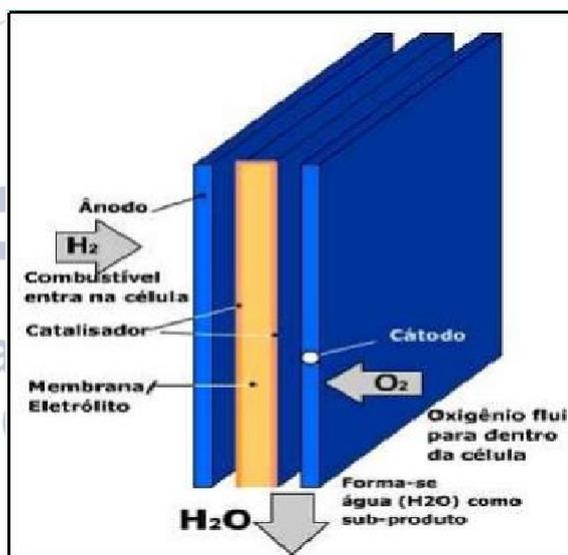
Em meados de 1839 Willian Grove criava uma nova técnica, chamada célula a combustível, tal inovação foi usada pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) como fonte de energia elétrica em suas viagens espaciais. Uma célula a combustível pode ser alimentada por diversas fontes como combustível, no entanto a mais usada e eficiente tem sido o hidrogênio, usando um dispositivo eletroquímico que converte energia química em energia elétrica e calor (ORMEROD, 2003). Dentre as células conhecidas, Hoffmann explica:

Neste caso o gás hidrogênio é pressurizado e bombeado para o ânodo. O gás é forçado a passar por canais de fluxo até atingir o catalisador.

Em contato com o catalisador, o hidrogênio separa em dois íons (H^+) e dois elétrons (e^-). Os elétrons são encaminhados para um circuito externo, onde é formada uma corrente elétrica. Os gases de hidrogênio, que foram quebrados pelo catalisador, vão em direção ao eletrólito. Do outro lado da célula, o gás oxigênio é bombeado para o cátodo e forçado a passar por canais de fluxo até ao catalisador. No catalisador, as moléculas de oxigênio combinam-se com os íons de hidrogênio que atravessaram o eletrólito, para formar água, como resíduo (HOFFMANN, 2005 *apud* LINARDI, 2008, p. 15).

Tal processo de geração de energia pode ser classificado como um processo limpo no qual não impactaria o meio ambiente, levando-se em conta que células de hidrogênio e oxigênio resultariam apenas em água e calor como subproduto, como se observa na Figura 2, a seguir:

Figura 2 - Composição de uma célula a combustível ideal



Fonte: Portal célula a combustível, 2022.

É uma tecnologia que está se tornando cada vez mais popular e oferece alta eficiência mesmo em baixos níveis de energia em comparação com outras tecnologias tradicionais de fabricação. As células de combustível são ecologicamente corretas porque não produzem gases nocivos, não emitem partículas poluentes que afetam a qualidade do ar durante sua operação normal (SANTOS; SANTOS, 2004).

2.2 DESENVOLVIMENTO BRASILEIRO NA TECNOLOGIA DO HIDROGÊNIO

O Brasil é um país conhecido por ser rico em matérias primas, possui boas condições para se tornar um bom fornecedor na produção de fontes de energia renováveis e novos combustíveis. Com o intuito de guiar e colaborar com o desenvolvimento o Ministério de Minas e Energia (MME) e outros especialistas criaram o Roteiro para Estruturação da Economia do Hidrogênio no Brasil (MME, 2021). A seguir descrevem-se os tópicos do Roteiro elaborado:

- (a) A valorização de diferentes rotas tecnológicas nas quais o Brasil pudesse ter vantagens competitivas, como: o etanol (não só pela reforma, mas também por oxidação direta em células a combustível); a eletrólise da água (utilizando-se a eletricidade secundária de hidroelétricas); e, outras biomassas, além da cana de açúcar, incluindo-se o biogás;
- (b) O reconhecimento do papel do gás natural para facilitar a transição para uma fase dominada por hidrogênio verde;
- (c) A definição de uma lógica de difusão de mercado para o hidrogênio: a geração distribuída de energia; a produção de energia em regiões isoladas e os ônibus urbanos (FERREIRA, 2021, p. 23).

O Brasil tem uma boa capacidade para produção do hidrogênio verde e células de hidrogênio, porém ainda necessitado de mais investimentos e pesquisas nestas tecnologias. Os brasileiros já possuem quatro grandes células de hidrogênio instaladas no território nacional, sendo três delas instaladas em Curitiba-PR e uma quarta no Rio de Janeiro-RJ, graças à parceria formada entre Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC), Companhia Paranaense de Energia (COPEL) e PETROBRAS (AZEVEDO, 2020).

No ano de 2003 foi criada a Estados Unidos “*International Partnership for the Hydrogen Economy*” (IPHE), integrada por 17 países sua missão é integrar e desenvolver tecnologias de células a combustível e Hidrogênio. Os membros do programa são: Austrália, Brasil, Canadá, China, Comunidade Europeia, França, Alemanha, Islândia, Índia, Itália, Japão, Coreia do Sul, Nova Zelândia, Noruega, Rússia, Reino Unido e Estados Unidos. O Brasil é o único membro da América Latina. Estes países representam 85% do PIB mundial, com 3,5 bilhões de pessoas e mais de 75% do consumo mundial de eletricidade, além de mais de 2/3 das emissões de CO₂ (IPHE, 2020, site).

O Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI) formalizou a Iniciativa Brasileira do Hidrogênio (IBH2) na Portaria nº6.100 no dia 11 de julho

de 2022, integrando e fortalecendo as ações governamentais na temática de Hidrogênio. Através da iniciativa o ministério lançou o Sistema Brasileiro de Laboratórios de Hidrogênio (SisH2-MCTI), com foco avanço científico, tecnológico, inovador e empreendedor na área do Hidrogênio, a formação e a capacitação de recursos humanos. Os projetos e programas serão escolhidos através de chamadas públicas, quanto aos participantes podendo ser da Instituições Científicas, tecnológicas, inovação ou até mesmo do setor privado (MCTI, 2022).

2.3 APLICAÇÃO DO HIDROGÊNIO NA AVIAÇÃO CIVIL

A Agência Nacional da Aviação Civil (ANAC) já acompanha as emissões de dióxido de carbono, e visando neutralizar as emissões no Brasil lançou a Resolução nº 496, onde desde o ano de 2018 já vem acompanhando e trabalhando na diminuição dos gases (ANAC, 2022). A real preocupação com poluentes é evidente em todos os setores, não deixando de fora as companhias aéreas, fabricantes, órgãos regulatórios e até os próprios consumidores do setor aéreo. As iniciativas e pesquisas têm se mostrado cada dia mais interessantes e eficientes, principalmente quando se fala de células a combustível.

Existem inúmeras vantagens em se utilizar células a combustível na aviação. Uma delas reside na redução das emissões de poluentes em praticamente cem por cento. Outro benefício dá-se pela diminuição da intensidade do ruído na própria aeronave e em torno dos aeroportos. Além disso, a energia elétrica gerada também pode ser utilizada para alimentar bombas elétricas de sistemas hidráulicos, e até mesmo substituir a APU - Unidade Auxiliar de Potência (dispositivo instalado geralmente na cauda, capaz de proporcionar energia para uma aeronave em solo ou em voo). A água pura derivada desse processo pode ser utilizada de diversas maneiras, como, por exemplo, em sistemas sanitários ou até mesmo para consumo dos passageiros, o que resultaria em uma considerável redução do peso da aeronave, uma vez que não seria necessário abastecê-la com esse insumo (BETIOLO; ROCHA; MACHADO, 2015, p. 5).

No entanto, as altas temperaturas dos motores das aeronaves também fazem com que o oxigênio se combine com o nitrogênio e libere óxidos de nitrogênio (NOx), embora em quantidades menores. Isso significa que as

aeronaves movidas a hidrogênio não estarão 100% livres de gases, por isso usam a afirmação “livre de carbono” (INOVAÇÃO TECNOLÓGICA, 2021).

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A metodologia organiza os fatores necessários para a elaboração de um estudo científico, dentre as diversas abordagens, técnicas e processos utilizados para o conteúdo a ser exposto de uma maneira sistemática (RODRIGUES, 2007). O trabalho realizado baseou-se em uma pesquisa descritiva com procedimento bibliográfico e documental, de natureza aplicada e abordagem qualitativa (MARCONI; LAKATOS, 2003).

3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

A pesquisa é uma forma de investigação sistêmica que procura respostas e tem como objetivo encontrar soluções ou explorar o conhecimento de problemas e técnicas. No presente trabalho a pesquisa é de finalidade aplicada, pois “os conhecimentos adquiridos são utilizados para aplicação prática voltados para a solução de problemas concretos da vida moderna” (RODRIGUES, 2007, p. 2). A pesquisa é de extrema importância uma vez que nela identificamos o problema e ou oportunidade.

3.2 PROCEDIMENTOS PARA COLETA DE DADOS

A definição do ambiente de pesquisa para a coleta de dados para o trabalho é de grande abrangência lavando-se em consideração que o tema é mundialmente explorado e de grande importância ambiental. O estudo coletou dados a partir do ano 1990 até os dias atuais, considerando projeções futuras na aviação civil.

Conforme Fonseca (2002 *apud* GERHARDT; SILVEIRA, 2009) afirma que o procedimento bibliográfico se dá através de leitura dos materiais literários a respeito do objeto de estudo, enquanto o procedimento bibliográfico realiza

consultas em fontes de caráter informativo como revistas, relatórios governamentais, jornais e outros. Outro procedimento foi o documental, conforme Gil (1999) teve o objetivo de descrever e comparar dados, características da realidade presente e do passado.

Assim coletou-se os dados necessários para a realização do estudo, relatando o que parte do que foi pesquisado incluídos através de citações diretas ou indiretas de livros, artigos, dissertações, teses, entre outros. Toda parte regulatória coletada de publicações legais e sites oficiais dos correspondentes órgãos responsáveis, como a Agência Nacional da Aviação Civil (ANAC) e Organização da Aviação Civil Internacional (OACI). As projeções futuras de tecnologias a serem implantadas foram coletadas através dos sites oficiais das principais fabricantes de aviões no mundo. Considerando que o mercado aeronáutico ainda inova e tem uma enorme concorrência entre os fabricantes, os projetos não são especificados com grandes detalhes, apenas descritos superficialmente contendo cada um os seus segredos.

3.3 ANÁLISE DOS DADOS

Pode-se considerar a análise dos dados uma fase muito importante do estudo, uma vez que todo um trabalho de pesquisa e coleta foi realizada. O estudo de caso tem como intuito analisar um fenômeno em seu contexto real buscando identificar as variáveis que interferem nele (LENZI, 2020).

O trabalho não discute abordagens para outros tipos de tecnologias, como Biomassa ou Bioquerosene, que também poderão ser alternativas viáveis para o futuro. Este estudo descreve de forma qualitativa a função das tecnologias relacionadas ao hidrogênio e células a combustível, relacionando-as à aviação de modo a atingir os objetivos propostos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Segundo Linardi (2012, p. 11), “mesmo que existam dificuldades durante a implementação da dita economia do hidrogênio, é possível que esses obstáculos

possam ser vencidos”. Há uma gama de oportunidades na introdução do hidrogênio de opção como energia alternativa que oportunizara o surgimento de novas empresas e evolução tecnológica do setor da aviação.

O motivo que pode ser agregado ao desenvolvimento e gradativo interesse na tecnologia das células a combustível nos últimos anos pode estar relacionado a vários aspectos, mas em especial à crescente procura por fontes de energia limpas, visando assegurar o equilíbrio do meio ambiente.

Embora a tecnologia de células a combustível não esteja ainda completamente estabelecida, verifica-se que a sua implementação no mercado não deve tardar, pois já está assegurada em nichos onde o fator meio ambiente é preponderante. Além disso, este energético pode, num médio prazo, dependendo de seu desenvolvimento tecnológico, representar um papel importante no cenário mundial de energia (LINARDI, 2010, p.9).

Com papel importante no cenário mundial de novas energias, a tecnologia de célula a combustível têm sido cada vez mais reconhecida como uma maneira de produzir eletricidade de forma limpa e com alta eficiência energética, diminuindo os problemas ambientais e conseqüentemente melhorando as condições sociais. Em relação aos benefícios ambientais que essa tecnologia promove, de maneira geral, podem ser citados: a diminuição no consumo de produtos à base de petróleo; menos gases que podem causar o efeito estufa e mais eficiência na geração de energia (AZEVEDO, 2020).

De acordo com Schneider (2007), as tecnologias do hidrogênio e célula a combustíveis oferecem novas alternativas na transição para uma economia de baixo carbono, dado seu desempenho, operação e experiência de consumo semelhantes às tecnologias movidas a combustíveis fósseis.

Sendo considerado o combustível do futuro, por ser até então tida como uma fonte renovável e inesgotável, o hidrogênio pode ser um protagonista na atuação de preservação do meio ambiente. Apresenta alta capacidade de gerar energia, possui baixo peso molecular e maior energia por unidade de massa que outros tipos de combustíveis. No que tange o aspecto da aviação civil, ele seria capaz de garantir poucas modificações nos aviões, devido ao pouco espaço que seria utilizado para o eletrolisador (AIRBUS, 2020).

Existem diversas instituições no Brasil dispostas e interessadas a engajar-se cada vez mais em pesquisas relacionadas no desenvolvimento de células a combustível puramente nacionais, buscando exportá-las para fortalecer ainda mais a economia. Cabe mencionar, no entanto, que é estritamente necessário e importante o incentivo por parte do governo no país para que todos esses projetos pensados tenham sucesso. Segundo Schneider (2007), com uma grande capacidade hidráulica e sucro-alcooleira, o Brasil poderá produzir hidrogênio para exportar e utilizar em suas próprias células a combustível.

O impacto causado no meio ambiente da utilização de CO₂ no mundo já vêm sendo discutido. No Brasil, representantes da ANAC (Agência Nacional de Aviação Civil), IATA (Associação Internacional de Transportes Aéreos), Ministério da Infraestrutura, Ministério de Minas e Energia e empresas dos setores aéreo e ambiental, se reuniram a fim de promover soluções para esses impactos e suas implicações, através da implementação do Esquema de Compensação e Redução de Carbono para a Aviação Internacional (*Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation - CORSIA*) (ANAC, 2022).

Diante do que foi exposto durante a implementação do Esquema de Compensação e Redução de Carbono para a Aviação Internacional, tornou-se ainda mais evidente que a principal solução para esses impactos ambientais é, sobretudo, a implementação de aviões que possuam combustíveis com altos níveis de sustentabilidade. O CORSIA apresenta como principal objetivo estabilização nos níveis de carbono observados em 2020, não prejudicando o crescimento do setor aéreo (ICAO, 2022).

Esse processo e preocupação de emissões de carbono, bem como a participação do Brasil no CORSIA iniciou-se em janeiro de 2019 e conta com a fiscalização do setor responsável pela aviação no país, a ANAC. A Resolução nº 496, de 28 de novembro de 2018 contém as diretrizes que os operadores brasileiros devem seguir para cumprir com os requisitos do programa (ANAC, 2022).

4.1 PROJETOS VISANDO A PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO NO BRASIL

Após conhecimentos e pesquisas acerca do potencial energético e econômico do hidrogênio, bem como as suas largas vantagens tanto para o meio ambiente quanto para o setor econômico e social. Alguns projetos fazendo uso de hidrogênio para aviação civil vem sendo pesquisados, trazendo explorações e produções dessa fonte energética, além dos seus principais fabricantes.

4.1.1 Projeto Base One

O projeto *Base One* tem o objetivo de produzir hidrogênio através do processo da eletrólise, com um investimento estimado em US\$ 5,4 bilhões em uma parceria do governo do Ceará com a empresa *Energix Energy*. A empresa construirá a maior usina de hidrogênio verde do mundo, produzindo mais de 600.000 toneladas de hidrogênio verde por ano a partir de 3,4 GW de projetos combinados de energia eólica e solar (CANAL ENERGIA, 2021, site). O projeto *Base One* será construído no Ceará, proporcionando uma localização estratégica para a produção de hidrogênio e acesso direto a todos os principais mercados internacionais via frete marítimo (ENGIE, 2022).

Uma área industrial de 500 hectares foi reservada no Porto de Pecém-CE, alimentada por energia renovável de emissão zero. A instalação aproveitará o vasto potencial de produção energética que a localização da usina oferecerá com energia solar fotovoltaica e também energia eólica com produção *onshore* e *offshore* (CANAL ENERGIA, 2021). Marco Stacke, diretor de operações da *Energix* informa, “nós podemos transformar o hidrogênio em energia e vender para o grid. Podemos vender nosso hidrogênio tanto como energia, como combustível” (MACHADO; CHIAPPINI, 2021, site).

De acordo com os dados da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), mais da metade da energia cearense, exatamente 58% (eólica e solar combinadas), hoje é gerada a partir de fontes renováveis. O Ceará evoluiu de consumidor para exportador de energia elétrica (MARTINS, 2022).

O *Base One* tem potencial para redução de emissões de carbono em 10 milhões de toneladas por ano, tornando-se assim o maior projeto de redução de carbono do mundo. O período de construção deste projeto está previsto em 3 a 4 anos, considerando o seu sistema de construção modular, entrar em operação antes do período previsto (CANAL ENERGIA, 2021).

4.1.2 Projeto da Airbus para aplicação do hidrogênio na aviação civil

Com a ambição de produzir o primeiro avião comercial com emissão zero de carbono (CO²) no mundo, em setembro de 2020 a Airbus lançou seu projeto ZEROe, que até 2035 almeja-se já estar implantado em rota pela fabricante (Figura 3). A Aeronave projetada será movida por combustão de hidrogênio através de motores turbinas a gás modificados alimentados por hidrogênio líquido mesclado com oxigênio. As células de combustível de hidrogênio também geram energia elétrica, que serão usadas como fonte de energia para o sistema *Auxiliar Power Unit* (APU), resultando em um sistema de propulsão híbrido-elétrico, capaz de tornar a aviação civil mais sustentável e eficiente (AIRBUS, 2022).

Figura 3 - Modelos Airbus ZEROe



Fonte: Airbus, 2022.

Testar e comprovar a viabilidade de projetos na aviação pode ser algo um

tanto quanto desafiador, para isso são usadas aeronaves demonstradoras, que são fundamentais para esse tipo de desenvolvimento. Pode-se testar inúmeras possibilidades tanto em solo como também no ar, servindo como amostra para investidores, governo e futuros usuários. Levando em conta que o A380, é a maior e mais espaçosa aeronave para passageiros do mundo, foi escolhida como plataforma de testes, diz Mathias Andriamisaina, líder do Demonstrador Airbus ZEROe (AIRBUS, 2022).

É uma plataforma segura e confiável, altamente versátil para testar uma ampla gama de tecnologias de emissão zero. Além disso, a plataforma pode acomodar confortavelmente a grande instrumentação de teste de voo que será necessária para analisar o desempenho do hidrogênio no sistema de propulsão de hidrogênio (AIRBUS, 2022, site).

O demonstrador além de toda a estrutura normal da aeronave, passa a ser equipado com quatro tanques de hidrogênio líquido que distribuído alimentará o sistema de condicionamento transformando sua forma em gasosa alimentando um motor a combustão de hidrogênio. Todo o sistema será implantado na parte traseira da aeronave, como demonstrado na Figura 4, a seguir (AIRBUS, 2022).

Figura 4 - Aeronave demonstradora Airbus ZEROe



Fonte: Airbus, 2022.

O desenvolvimento do motor a combustão de hidrogênio é algo de grande importância no projeto ZEROe, a Airbus que não é uma fabricante de motores formou uma parceria com a CFM *International*, uma *joint venture* entre a fabricante

de motores *General Electric* (GE) e a Safran. A empresa escolheu o motor *Turbofan GE Passport TM* com maquinário avançado, tamanho físico e fluxo de combustível adequados, modificando o combustor e sistema de controle do motor (AIRBUS, 2022).

4.1.3 Projeto da Embraer para aplicação do hidrogênio na aviação civil

A Embraer, fabricante brasileira com mais de 50 anos de mercado, desenvolveu diversos modelos diferentes de aeronaves que atuam em diferentes aéreas da aviação civil e militar. Da mesma forma lançou quatro novos protótipos voltados para um programa de carbono zero. O Projeto *Energy Family*, tem o conceito voltado para o mercado e incluem diferentes propostas de mobilidade, como eletricidade, célula de combustível de hidrogênio, turbina a gás (motor a jato tradicional) biocombustível e híbrido-elétrico (UBIRATAN, 2021). Luís Carlos Affonso, vice-presidente sênior de Engenharia, Tecnologia e Estratégia Corporativa da Embraer, destaca que:

Não há solução fácil ou única para chegar à emissão zero. Novas tecnologias e sua infraestrutura de suporte serão disponibilizadas com o tempo. Estamos trabalhando agora para ajustar os primeiros conceitos de avião, aqueles que podem começar a reduzir as emissões o quanto antes (EMBRAER, 2021, site).

Projetos em plataformas menores permitem avançar conceitos básicos sem um alto nível de investimento e complexidade como em projetos maiores. A Embraer realizou o primeiro voo de teste em agosto com o EMB-203 Ipanema (aeronave agrícola), que é equipado com motor elétrico. O objetivo principal do projeto é obter informações sobre o desempenho do motor e das baterias na prática (UBIRATAN, 2021).

Alguns dos principais anúncios incluem a localização dos motores da aeronave, que serão montados na cauda, e a possibilidade de reabastecimento de hidrogênio. Luís Carlos Affonso, afirma que “o conceito de motor de cauda ofereceria uma cabine mais silenciosa e desempenho semelhante ao dos jatos” (LIMA, 2022, site). Estes motores estão entre os mais avançados da aviação comercial e podem ser

vistos na Figura 5 a seguir:

Figura 5 – Aeronaves *Family Energy* da Embraer



Fonte: Embraer, 2021.

A intenção de uso de célula de combustível de hidrogênio está projetada para 2025, a aeronave elétrica de pouso e decolagem vertical (EVTOL) e será lançado em 2026 construída pela Eve, subsidiária de Mobilidade Aérea Urbana da Embraer. Em busca de uma nova geração alimentada por fontes mais limpas, a empresa almeja operações neutras em carbono até o ano de 2040 e emissões líquidas zero de carbono até 2050 (PENANTE, 2021).

Assim, os projetos e pesquisas na tecnologia das células a combustível e de hidrogênio seguem em frente, registrando importante evolução que será seguida também nas próximas etapas, com comprometimento ambiental e sustentabilidade, além de se projetar motores igualmente eficazes. Se identificam diferentes estratégias nas empresas e organizações, em uma corrida pela inovação. A Airbus optando por plataformas grandes, mas também com grandes custos, se mostra disposta a aplicar tal tecnologia o quanto antes. Não distante e com estratégias diferentes, uma das maiores fabricantes aeronáuticas do mundo e que é uma empresa Brasileira, a Embraer se mostra muito bem posicionada neste quesito, com bons projetos para a utilização do hidrogênio objetivando a redução de emissões de carbono. Os estudos prosseguem em desenvolvimento para o melhor uso desta nova tecnologia buscando segurança, sustentabilidade e o seu

melhor aproveitamento como fonte energética.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conhecidos os problemas ambientais causados pelas emissões de gases de efeito estufa, a ideia de vislumbrar o hidrogênio como uma possível alternativa aos combustíveis fósseis torna-se cada vez mais relevante. Existem inúmeras maneiras de extrair o hidrogênio da atmosfera, mas para ser ecologicamente correto tal procedimento deve ser executado usando fontes renováveis como alimentação, uma vez que todos os processos conhecidos necessitam de energia elétrica.

Constatou-se que o processo de eletrólise da água se mostra muito eficiente e fez grandes avanços no rendimento do processo. Conhecendo vários aspectos teóricos da tecnologia do hidrogênio, a inclusão do hidrogênio como transportador de energia pode ser uma alternativa promissora para o futuro. Cabe ressaltar que as pesquisas, incentivos de investimento e utilização dessa nova fonte energética devem ser cada vez mais incentivados para viabilizar a tecnologia do hidrogênio como combustível num futuro próximo.

Considerando que a aviação é um dos meios de transporte mais abrangente e eficiente, também é responsável por um grande consumo de combustível e consequentemente um alto nível de emissão de carbono na atmosfera. O estudo identificou uma busca eminente por novas tecnologias dos principais fabricantes e órgãos regulatórios da aviação civil, através de projetos e testes, protótipos e motores alimentados por hidrogênio, com tecnologias que estão cada vez mais perto de serem aplicadas na prática.

Entretanto, existem alguns desafios na aplicação dessa nova fonte energética, como por exemplo a segurança e a logística, dois quesitos extremamente relevantes em especial para a aviação. Os interesses geopolíticos também são importantes nesta questão, uma vez que todas as potências na economia mundial dependem do petróleo e estão desenvolvendo pesquisas para identificar novas tecnologias para substituição do petróleo como principal insumo energético. Todavia quando este processo tecnológico, logístico e mercadológico

estiver mais consolidado, pode-se acreditar de fato na nova economia do hidrogênio, que deverá ser aplicada na aviação e nos demais meios de transportes.

REFERÊNCIAS

AIRBUS. **Airbus e CFM International são pioneiras na tecnologia de combustão de hidrogênio.** AIRBUS, 22 fev. 2022. Disponível em:

<https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2022-02-airbus-and-cfm-international-to-pioneer-hydrogen-combustion> . Acesso em: 30 maio 2022.

AIRBUS. **O demonstrador ZEROe chegou.** AIRBUS, 22 fev. 2022. Disponível em:

<https://www.airbus.com/en/newsroom/stories/2022-02-the-zeroe-demonstrator-has-arrived> . Acesso em: 30 maio 2022.

ANAC. **ANAC e setor discutem compensação de carbono em voos internacionais.** Gov.br, 2022. Disponível em:

<https://www.gov.br/anac/pt-br/noticias/2022/anac-e-setor-discutem-compensacao-de-carbono-em-voos-internacionais> . Acesso em: 29 maio 2022.

AZEVEDO, J. **Entenda o que é e como funciona uma célula de hidrogênio.** Ecycle.com.br, 2020. Disponível em:

<https://www.ecycle.com.br/celula-de-hidrogenio/> . Acesso em: 27 maio 2022.

BETIOLO, C. R.; ROCHA, G. C.; MACHADO, P. R.C. **Iniciativas da aviação para redução das emissões de CO2.** VIII SITRAER, 2015. Acesso em: 02 jun. 2022.

BRAGA, L. B. **Análise Econômica do uso de célula a combustível para acionamento de ônibus urbano.** 2010. 97 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Energia, Unesp, Guaratinguetá, 2010.

CANAL ENERGIA. **Enegix assina memorando para construção de planta de H2 no CE anal Energia,** 2021. Disponível em:

<https://www.canalenergia.com.br/noticias/53165231/enegix-assina-com-ceara-memorando-para-projeto-de-hidrogenio-verde-de-us-54-bi> . Acesso em: 23 jul. 2022.

DEMIR, N.; TASKIN, A. **Life cycle assessment of wind turbines in Pınarbaşı-Kayseri.** Journal of Cleaner Production, Amsterdam, p. 253-263. 23 abr. 2013.

Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095965261300231X> . Acesso em: 15 ago. 2022.

ENGIE. **Alem de Energia**. ENGIE, 19 out, 2020. Disponível em: combustivel/?gclid=CjwKCAiAy_CcBhBeEiwAcoMRHPvmZDoXk1rQbWkDuUoVr1A https://www.alemdaenergia.engie.com.br/saiba-como-o-hidrogenio-se-transforma-em-psyFJJ9lauqNf4CqL9l_cmyFQE_MBoC6iQQAuD_BwE . Acesso em: 25 out. 2022.

FERREIRA, T. V. B. **Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio**. Empresa de Pesquisa Energética, 2021.

Disponível em:

[https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-569/Hidroge%CC%82nio_23Fev2021NT%20\(2\).pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-569/Hidroge%CC%82nio_23Fev2021NT%20(2).pdf) . Acesso em: 20 out. 2022.

FONSECA, J. J. S. **Metodologia da Pesquisa Científica**, 2002. Disponível em:

<https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=oB5x2SChpSEC&oi=fnd&pg=PA6&ots=ORWV1rdph-&sig=eoVTiBCBV5kfO4V6vlqCZpYtjoQ#v=onepage&q&f=false> . Acesso em: 15 abr. 2023.

GERHARDT, T. E.; SILVEIRA, D. T. **Métodos de pesquisa**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 5. ed. São Paulo:

Atlas, 1999. GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

ICAO. **Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSA)**. ICAO, 2022. Disponível em: <https://www.icao.int/environmental-protection/CORSA/Pages/default.aspx> . Acesso em: 19 nov. 2022.

INOVAÇÃO TECNOLÓGICA. **Aviões a hidrogênio prometem aviação livres de emissões**, dez. 2022. Disponível em:

<https://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=avioes-hidrogenio-prometem-aviacao-emissao-zero&id=010170211208#.ZEIbCXbMLIU> . Acesso em: 15 abr. 2023.

IPHE. **Dia de Hidrogênio e Células de Combustível 2020**. iphe.net, 2020.

Disponível em: <https://www.iphe.net/hydrogen-and-fuel-cell-day> . Acesso em: 29 ago. 2022.

LENZI, G. K. S. **Metodologia Científica**. Florianópolis: Aerotd, 2020

LIBERATO NETO, R. L.; MOREIRA, J. R. S. **Geração e combustão do hidrogênio obtido através do processo de eletrólise da água**. São Paulo:

R. bras. Av. civil. ci. Aeron., Florianópolis, v. 3, n. 2, p. 159-182, abr-jun. 2023.

Universidade de São Paulo, 2007. Disponível em:
http://sites.poli.usp.br/d/pme2600/2007/Artigos/Art_TCC_018_2007.pdf .
Acesso em: 14 nov. 2022.

LIMA, K. E. Confira primeiras imagens e detalhes sobre avião a hidrogênio da Embraer. **Olhar Digital**, 2021. Disponível em:
<https://olhardigital.com.br/2021/08/14/carros- e-tecnologia/confira-primeiras-imagens-e-detahes-sobre-aviao-a-hidrogenio-da-embraer/> . Acesso em: 15 ago. 2022.

LINARDI, M. **Hidrogênio e Células a Combustível**. Economia e Energia, 2008. Disponível em:
<http://flamingo.ipen.br/bitstream/handle/123456789/5047/13157.pdf?sequence=1&isAllowed=y> . Acesso em: 25 abr. 2023.

LINARDI, M. **Hidrogênio e Células a Combustível: Programa Brasileiro de I&D**, abr. 2010. Disponível em:
<http://flamingo.ipen.br/bitstream/handle/123456789/4351/17912.pdf?sequence=1&isAllowed=y> . Acesso em: 25 abr. 2023.

MACHADO, N.; CHIAPPINI, G. **EPBR**, 2021. Disponível em:
<https://epbr.com.br/exportacao-de-hidrogenio-atrai-plano-de-investimento-de-us-5-bi-para-o-ceara-2/> . Acesso em: 28 jul. 2022.

MADSEN, R.; HENKES, J. A. **A aviação civil e a inserção do bioquerosene no Brasil**. Revista Brasileira de Aviação Civil & Ciências Aeronáuticas, 2021. Disponível em:
<https://rbaccia.emnuvens.com.br/revista/article/view/5> . Acesso em: 20 out. 2022.

MARCHETTI, C. **The Dynamics of Energy Systems and the Logistic Substitution Model**. International Institute for Applied System Analysis, Austria. 1990.

MARCONI, M. de A.; LAKATOS, E. M. **Fundamentos de Metodologia Científica**. São Paulo: Atlas, 2003.

MARTINS, P. **Ceará é protagonista na geração de energias renováveis e tem as melhores condições para alavancar seu potencial energético**. trendsce.com.br, 2022. Disponível em:
<https://www.trendsce.com.br/2022/05/16/ceara-e-protagonista-na-geracao-de-energias-renovaveis-e-tem-as-melhores-condicoes-para-alavancar-seu-potencial-energetico/> . Acesso em: 25 ago. 2022.

MCTI. **Iniciativa Brasileira de Hidrogênio (IBH2)**, jul. 2022. Disponível em:
<https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/noticias/2022/07/iniciativa-brasileira-de-hidrogenio-ibh2-e-publicada-pelo-mcti> . Acesso em: 15 abr. 2023.

MME. **Programa nacional de hidrogênio**, jul. 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/mme-apresenta-ao-cnpe-proposta-de-diretrizes-para-o-programa-nacional-do-hidrogenio-pnh2/HidrogenioRelatriodiretrizes.pdf> . 15 abr. 2023.

ONU, **ONU defende utilização de hidrogênio para reduzir energias poluentes**. 23 abr. 2019. Disponível em: <https://news.un.org/pt/story/2019/04/1669171> . Acesso em: 05 abr. 2023.

ORMEROD, R. M. **Solid oxide fuel cells**. Chemical Society Reviews, v. 32, n. 1, p. 17–28, 2003. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/10890897_Solid_Oxide_Fuel_Cells . Acesso em: 01 jun. 2022.

PAGLIARO, M. **Hydrogen-powered boats and ships**. Itália, 2020. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817384-8.00018-2> . Acesso em: 15 abr. 2023.

PENANTE, L. **Avião elétrico da Embraer começa testes de voo**. Tecmundo, 2021. Disponível em: <https://www.tecmundo.com.br/ciencia/223123-aviao-eletrico-embraer-comeca-testes-voo.htm> . Acesso em: 18 set. 2022.

PORTAL CÉLULA A COMBUSTÍVEL, 2022. Disponível em: <http://www.celulaacombustivel.com.br.htm> . Acesso em: 15 maio 2022.

RIFKIN, J. **A Economia do Hidrogênio**. São Paulo: M. Books, 2003. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/asoc/a/Hyh9HZbmqy9Wwr4gKR9ZCNQ/?format=pdf&lang=pt> . Acesso em: 20 maio 2022.

RODRIGUES, W. C. **Metodologia Científica**. Paracambi: FAETEC, 2007. Disponível em: https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/37073267/metodologia_cientifica-libre.pdf?1427057591=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DMetodologia_Cientifica_Prof_William_Cost.pdf&Expires=1682533087&Signature=Nd9NJV2BFKxc6pNqEb8W~3Sy3pJYemWFQ~FY6Ob4g6ymQyUVg5tIDLquPqbo5I4-WdbQrukWSgDwGwEwbz8Utwtamk5G~q6w~ANkRveS-BJxM7e3NzUWLDd7FD1rx-gbmQjj7jBn1y0KOrJHK50PDX2wwO3ChvlhVwKo7JtUPfAaYi9rwFGoUXpWfqUHJ0wwU39xt0aS-kJlbqvztIA~uqxhl9DWKXxBBGmf~6ZeDhAWO6-KDzRdFuD7ohLume77AkF2P6~bGbnhXKfKgb~lh88Q0q8WmPlg8H5ZsrjckbaWaPJnRDsXBLz8mluSI7VeTLRiQGCmbi2GgV-gSwzg_&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA . Acesso em: 15 abr. 2023.

SANTOS, F. A. C. M.; SANTOS, F. M. S. M. **Células de combustível**. 2004.

Disponível em:

<https://repositorio.ipv.pt/bitstream/10400.19/589/1/C%c3%a9lulas%20de%20com%20bust%c3%advel.pdf> . Acesso em: 15 abr. 2023.

SCHNEIDER, M. **The World Nuclear Industry Status Report 2007**.

Commissioned by the Greens-EFA Group in the European Parliament, V11, Bruxelas, Londres, Paris, 2007.

Disponível em:

<https://www.reaktorpleite.de/images/stories/pdf/20160713MSC-WNISR2016V2-HR.pdf> . Acesso em: 25 nov. 2022.

SILVA, I. A. **Hidrogênio: Combustível do Futuro. Ensaios e Ciência: C. Biológicas, Agrárias e da Saúde**, vol. 20, núm. 2, 2016, pp. 122-126.

Disponível em:

<https://www.redalyc.org/pdf/260/26046651010.pdf> Acesso em: 15 abr. 2023.

UBIRATAN, E. **Embraer lançou quatro aviões conceitos que vão usar a energia renovável**. Aero Magazine UOL, 2021. Disponível em:

https://aeromagazine.uol.com.br/artigo/embraer-lancou-quatro-avioes-conceitos-que-vaio-usar-energia-renovavel_7298.html

Acesso em: 03 set. 2022.

URSÚA, A. ; GANDÍA, L. M. ; SANCHIS, P. **Hydrogen production from water electrolysis: current status and future trends**. Proceedings Of The IEEE, New York, p. 410- 426. fev. 2012. Disponível em:

<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5898382>

Acesso em: 20 set. 2022.

VIOLA, L. **Estudo da produção de hidrogênio eletrolítico a partir de fontes eólica, solar e hidrelétrica**. 2015. Disponível em:

<http://hdl.handle.net/11449/123056> . Acesso em: 18 jun. 2022.