
PANORAMA ENERGÉTICO NA AVIAÇÃO CIVIL: O HIDROGÊNIO COMO COMBUSTÍVEL E A GEOPOLÍTICA

Bruno Garcia Marins
Humberto César Machado

RESUMO: Ao trazer para o panorama do modal civil aéreo, expõem-se diversos dilemas que cravam uma problemática acerca da troca do tipo de combustível. Este trabalho firma a presença da tecnologia necessária para utilização do hidrogênio como combustível na aviação civil. Pesquisa utilizou a metodologia hipotético-dedutiva para amostra do problema específico, seguido de possíveis soluções provisórias para teoria tentativa e então, a criticando para eliminação de erros. Foi feito o uso de procedimentos bibliográficos e documentais para melhor acuracidade de informações e melhor ambientação posto o paradigma. Observou-se que o uso do hidrogênio para motores a reação é uma possibilidade tangível, não necessitando de grandes alterações no motor para que ocorra. Além de que, com a utilização de um líquido criogênico possibilita a menor temperatura durante combustão e por tanto, menor desgaste das peças e maior longevidade da estrutura do motor.

Palavras-chave: Aviação civil; Panorama energético; Hidrogênio.

ENERGY OVERVIEW IN CIVIL AVIATION: HYDROGEN AS FUEL AND GEOPOLITICS

ABSTRACT: By bringing to the panorama of the civil air modal, several dilemmas are exposed that raise a problem about the Exchange of the type of fuel. This work confirms the presence of the technology necessary for the use of hydrogen as fuel in civil aviation. Research used the hypothetical-deductive methodology to sample the specific problem, followed by possible provisional solutions for tentative theory and then, criticizing it to eliminate errors. Bibliographic and documentary procedures were used for better information accuracy and better setting given the paradigm. It was observed that the use of hydrogen for jet engines is a tangible possibility, not requiring major changes in the engine for it to occur. In addition, with the use of a cryogenic liquid, it allows for a lower temperature during combustion and, therefore, less wear on parts and greater longevity of the engine structure.

Keywords: Civil Aviation; Energy overview; Hydrogen.

1 INTRODUÇÃO

Com a crise do petróleo na década de 1970, firmada a partir da descoberta da futura escassez deste recurso, o mundo se viu diante de um paradigma energético para suprimento das necessidades. Neste contexto, iniciou-se a procura por diversos compostos que poderiam realizar a função dos derivados do petróleo. Diante das descobertas, encontrou-se o hidrogênio, sendo este um elemento capaz de gerar energia à diversos modais e encontrado em abundância na atmosfera.

Ao trazer para o panorama do modal civil aéreo, expõem-se diversos dilemas que cravam uma problemática acerca da troca do tipo de combustível. Questões como a possível alteração do design aeronáutico, infraestrutura nos sítios aeroportuários e métodos operacionais revelam a necessidade de estudos para que ocorra a substituição do combustível sem que trave as engrenagens que rodam este setor. Concomitantemente, no aspecto político social apresenta embates que dificultam esta alteração, por mais que se mostre requerida à longo prazo.

As tensões estabelecidas entre os Estados por receio da perda de poder ou ganho abusivo de poder por outros, revela a necessidade de uma assertividade global para que os projetos avancem de forma à consolidar o uso do hidrogênio.

Este trabalho deve firmar a presença da tecnologia necessária para utilização do hidrogênio como combustível na aviação civil, enquanto que, permeiam-se tensões geopolíticas que inviabilizam os projetos por falta de políticas de incentivo para redução de custos.

Durante a investigação, deverá ser observado que o uso do hidrogênio para motores a reação é uma possibilidade tangível, não necessitando de grandes alterações no motor para que ocorra. Além de que, com a utilização de um líquido criogênico possibilita a menor temperatura durante combustão e por tanto, menor desgaste das peças e maior longevidade da estrutura do motor. Ainda pelas características fundamentais do uso deste elemento leve, poderá haver aumento da carga a ser embarcada nas aeronaves, facilitada por ser conseguido um poder de queima 2.8 vezes superior ao combustível fóssil utilizado.

Será evidenciado o paradigma geopolítico do tema, englobando-se tensões ocasionadas pelo uso do hidrogênio e abandono do uso de recursos “sujos”, além de se

explicitar a falta de políticas de incentivo para utilização deste, sendo esta para evitar possíveis conflitos com Estados que possuem grande poder.

A devida pesquisa utilizará da metodologia hipotético-dedutiva para amostra de um problema específico, seguido de possíveis soluções provisórias para teoria tentativa e então, a criticando para eliminação de erros. Juntamente, foi feito o uso de procedimentos bibliográficos e documentais para melhor acuracidade de informações e melhor ambientação posto o paradigma.

Por tanto, para a devida exposição da linha de raciocínio a ser desenvolvida, o artigo irá ser dividido em três seções: o hidrogênio na aviação civil, que dará a contextualização da consolidação deste no modal aéreo, o complexo da infraestrutura demandada para que haja a utilização permanente do composto e, por fim, a seção de abordagem da problemática geopolítica, tratando deste aspecto que interfere diretamente e fortemente na utilização e desenvolvimento das tecnologias para o uso de uma nova fonte de combustível.

2 O HIDROGÊNIO NA AVIAÇÃO CIVIL

Segundo o autor Junior (2015), a crise do petróleo de 1970 iniciou-se com a descoberta de que se tratava de um recurso natural não renovável.

Com isto, durante o mesmo ano, a General Motors criou um movimento a favor de uma economia do hidrogênio, pois já era de conhecimento de que o elemento contém características que o tornam um atrativo candidato à matriz energética, como por exemplo, o fato de ser o elemento mais abundante na atmosfera, ser não poluente e podendo ser armazenado e distribuído (FREIRE, 2012).

Ainda quando comparado com outros concorrentes, apresenta-se de forma a encaixar-se às necessidades para utilização devido aos resultados encontrados quando consumido (CONTRERAS et al, 1997).

Por haver baixa densidade material e grande capacidade e estabilidade de combustível, é consolidado a sua possibilidade de uso desde o meio do século XX (VERSTRAETE, 2009). No estudo publicado por Contreras et al (1997), é comparado o hidrogênio com

alguns de seus concorrentes de combustíveis de hidrocarbonetos¹ e o seu destaque é evidenciado por haver atribuições que resultam numa combustão mais rápida, forte e de maior amplitude. Por conta dos itens mencionados, fora idealizado para ser utilizado como combustível principal na utilização de motores de turbina a gás (VERSTRAETE et al, 2005).

Apesar dos estudos mais profundos terem sido realizados já ao início do século XXI, a adversidade vivenciada pela geopolítica mundial durante a crise do petróleo na década de 70, fez com que fosse criada a Associação Internacional para a Energia de Hidrogênio (IAHE), que resultou em investimento de alto valor por parte da Comunidade Europeia que buscava o conhecimento suficiente para disponibilizar projetos de adaptação de infraestrutura de uso da diferente fonte energética (ANDRADE, 2003).

Por se tratar de um panorama que engloba todos dependentes energéticos, a IAHE logo revelou seus planos de descobertas para o uso desta energia nos meios de transportes (REIMAN, 2009 & ZON, 2008).

Diante desta revelação, a NASA (National Aeronautics and Space Administration) na mesma década, como forma de réplica e demonstração de força, apresentou projetos de aeronaves de grande porte utilizando o hidrogênio em seu estado de líquido criogênico², pois neste estado o elemento possui um poder de queima por unidade de massa 2.8 vezes superior ao querosene³ utilizado (REIMAN, 2009 & ZON, 2008).

Entretanto, os projetos contavam com aviões de dimensões absurdas para a infraestrutura da época, inviabilizando o prosseguimento dos estudos.

Por tratar-se de um período da Guerra Fria⁴, a União Soviética (URSS)⁵ tinha pressa e força matriz para dar uma resposta tecnológica de alta força ao seu concorrente (REIMAN, 2009). Como resposta à organização americana, a URSS iniciou seus projetos de estudos para a viabilização da operação de uma aeronave civil movida a partir do mesmo

¹ Combustíveis de hidrocarbonetos, também são chamados de combustíveis fósseis por conterem alto índice de carbono e tendo como maior exemplo no panorama de transporte, o petróleo (CENTRO BRASILEIRO DE INFRAESTRUTURA, 2018).

² Líquido criogênico é por definição, a condição na qual para que um composto atinja seu estado líquido, ele seja submetido à uma temperatura muito baixa, entre -150°C e -273°C (GASLAB, 2021).

³ Querosene se trata de um combustível hidrocarboneto derivado do petróleo (SOLVEN, 2019).

⁴ Guerra fria se tratou de um período pós 2ª Guerra que havia tensões entre União Soviética e Estados Unidos da América em busca do poder soberano mundial (POLITIZE, 2017).

⁵ União Soviética se tratou da união de 15 países socialistas em busca do poder, tendo destaque pelo grande poder militar que possuíam (POLITIZE, 2019).

componente pensado nos estudos deficientes do seu oponente.

Por isso, o pensado foi na reutilização de design de uma aeronave já projetada e com boa aceitação no mercado, a aeronave Tupolev TU-154 (ZHURAVLEV, 2014). O TU-154 passou por diversas modificações durante seu tempo ativo, mas já havia bom reconhecimento pelo mercado por cumprir formidavelmente a demanda existente e por isso, cessou sua produção apenas em 2013 com um número de mais de 1.000 unidades produzidas após 45 anos do início de sua montagem (DUFFY & KANDALOV, 1996 & RABINOWITZ, 2013).

Então se criou o Tupolev TU-155, que se tratava do modelo TU-154 com alterações para a utilização do elemento mais abundante na atmosfera como combustível. O primeiro voo do TU-155 ocorreu em 1988, com segurança e utilizando o composto em estado líquido em um de seus três motores e duraram 21 minutos (REIMAN, 2009).

Após diversos testes, conseguiram executar o voo todo alimentado não só por este mesmo combustível, mas por gás natural também. O projeto era promissor e tinha a expectativa de continuação com a versão Tupolev TU-156 que teve seu projeto no papel, entretanto, com a dissolução da URSS em 1991, o desenvolvimento foi descontinuado (REIMAN, 2009).

Com os estudos incompletos, a possibilidade de utilização de uma fonte limpa como matéria prima para energia no modal aéreo civil perdeu espaço entre os anos de 1990 e 2000. Todavia, a mentalidade mundial ao redor do meio ambiente voltou a ganhar espaço no início do século XXI, fazendo com que o hidrogênio voltasse aos holofotes. Com a difusão da mentalidade do *eco-friendly*⁶, fez com que se buscassem novamente alternativas para manutenção do estilo de vida moderno sem que fossem nocivas ao meio ambiente.

Devido à visibilidade ganhada pelo elemento novamente, estudos voltaram a ser desenvolvidos no início dos anos 2000. No ano de 2005, com o lançamento do artigo “An approach to the use of hydrogen for commercial aircraft engines” no Jornal de Engenheiros Aeronáuticos, a Escola Técnica Superior de Engenheiros Aeronáuticos da Espanha e a Universidade Politécnica de Madri revelaram dados que trazem vantagens não só para o meio ambiente ao utilizá-lo, mas também para a estrutura dos motores aeronáuticos

⁶ *Eco-friendly* se trata de um conceito no qual há atitudes, serviços, produtos e diretrizes políticas que buscam ser não nocivas ao meio ambiente (INSTITUTO BANCORBRÁS, 2013).

(CORCHERO & MOTANÉS, 2005).

No artigo hora referendado, foram utilizados 4 motores já de conhecimento no mercado aeronáutico para testes de execução com alimentação de LH₂⁷, pois sua utilização nos propulsores aeronáuticos é dada quando comprimido, se mantendo a baixa densidade na condição de líquido (BARBIR, 2005).

Os motores selecionados foram: BRR710-48, V2527A5, Trent 884 e PW120 turboélice. O primeiro modelo citado é produzido pela Rolls Royce e equipa aeronaves executivas para aviões de longo alcance. O segundo modelo citado é produzido pela International Aero Engines⁸ (IAE) e equipa aeronaves conhecidas no mercado comercial, como o Airbus A320. Já o terceiro modelo é produzido pela Rolls Royce e equipa aeronaves Boeing 777. E o último modelo é produzido pela Pratt & Whitney e equipa aeronaves regionais como o ATR42 e 72 (BARBIR, 2005).

Na simulação do estudo com os motores citados, foi encontrado que uma grande massa de combustível seria economizada devido a redução de 64.7% do consumo instantâneo do líquido para combustão, o que apresentou possibilidade de economia a partir da utilização do hidrogênio (CORCHERO & MONTANÉS, 2005).

Como conclusão encontrada fora apontada que, a baixa densidade do hidrogênio em comparação ao querosene, possibilitaria a diminuição do peso embarcado na aeronave e possibilitaria maior carga paga⁹ a ser carregada, além de que, com o uso deste elemento havia a queda das temperaturas internas do motor e por isto, evitaria desgaste excessivo de peças, resultando na maior longevidade do equipamento (CORCHERO & MONTANÉS, 2005).

3 O HIDROGÊNIO: Complexo de Infraestrutura

No panorama recente, tem-se a possibilidade de uso e obtenção do hidrogênio como combustível classificado por cores, sendo elas: cinza - quando produzido a partir de

⁷ LH₂ se trata do elemento hidrogênio em seu estado de líquido criogênico (WOLF, 2002).

⁸ *International Aero Engines* se trata do conjunto das cinco maiores fabricantes de motores aeronáuticos, sendo uma grande potência mundial no setor (INTERNATIONAL AERO ENGINES, 2010).

⁹ Carga paga é a quantidade de itens e/ou pessoas embarcadas que utilizam da compra de um bilhete (AOPA, 2017).

combustíveis fósseis, azul – quando produzido a partir de gás natural e contém a captura e armazenamento do carbono e verde – quando produzido por eletrólise, resultando em nenhuma emissão de carbono.

Para a captura do elemento, há métodos de separação a partir de moléculas que possuem ligação com o hidrogênio. Entre esses métodos há alguns mais desenvolvidos e firmados como confiáveis, são eles:

a) Reforming, que utiliza gás natural ou outros hidrocarbonetos em altas temperaturas em seu estado gasoso para que tenha como produto, o H₂. Como desvantagem desse processo há o alto custo por unidade de energia, utilização a partir de combustíveis fósseis não renováveis e a liberação do CO₂ no meio ambiente (SANTOS, 2005). 48% da produção mundial do hidrogênio é por reforming a partir do metano (CH₄), que é o mais comum e mais barato método de produção do hidrogênio na década de 2000 (BALAT, 2008);

b) Hidrólise, que possibilita a utilização de fontes renováveis (eólica, solar, biomassas etc.) para separação das moléculas de hidrogênio presentes e após, a armazena (FERNANDES et al, 2011). Sua dificuldade está na alta temperatura requerida para execução de quebra das moléculas para que se obtenham as matérias separadas (AMY & KUNYCKY, 2019);

c) Gaseificação de Biomassa, através da biomassa a ser utilizada é convertida em uma mistura de CO, CO₂, H₂, CH₄, traços de hidrocarbonetos pesados, água, nitrogênio entre outros componentes que possuem a molécula de hidrogênio (LOBKOV et al, 2006). Por se tratar de um processo que utiliza matérias de grande abundância na atmosfera para sua execução, é dado como ótima opção para diminuir dependência energética sob os combustíveis fósseis apesar de não ser completamente não nocivo ao meio ambiente (DEMIRBAS, 2006);

d) Eletrólise da água, é uma possibilidade de produção inteiramente limpa. Na década de 2000, representou 4% da produção mundial de hidrogênio (SERGEANT et al, 2007), e tem a utilização de energia elétrica para separação dos elementos que compõem a água, tendo rendimento de execução na casa dos 95% (SANTOS, 2005). Apesar da necessidade de energia elétrica para sua execução, essa energia pode ser gerada por fontes limpas e renováveis, sendo um processo não nocivo ao meio ambiente (FERNANDES et al,

2011). A eletrólise é o único método disponível para produção de hidrogênio em larga escala para era pós-combustíveis fósseis e por isso há procura para barateio de produção (SHERIF et al, 2003).

Apesar das diversas formas de obtenção, por haver baixa densidade e requerir de baixíssima temperatura para estado líquido (ideal para uso no modal aéreo civil), se dificulta o armazenamento utilizando os meios comuns (FERNANDES et al, 2011). Na aviação, para armazenamento há a preocupação quanto à infraestrutura necessária, na qual evita-se utilização de tanques muito pesados e por isto, é ensejado um sistema de refrigeração capaz de manter sua baixa temperatura, estimada de $-251,9^{\circ}\text{C}$ sob pressão ambiente (AMY & KUNYCKY, 2019).

Apesar de ser encontrado boas mantas térmicas e meios de refrigeração para manutenção de temperatura, há a longo prazo a troca de calor com o ambiente externo e por isso, não se deve deixá-lo tempo demasiado estocado, necessitando de uma produção constante e exata (FERNANDES et al, 2011).

No artigo titulado “Hydrogen as a Renewable Energy Carrier for Commercial Aircraft”, é realizado um estudo de caso no aeroporto de Los Angeles (LAX), no qual seria alimentado inteiramente pelo LH2.

Como é elucidada no projeto, a conversão de fonte energética demandaria décadas e alta quantia financeira para a execução por completa e, portanto, se tem como ideia satisfatória iniciar-se o processo de abandono dos derivados do petróleo a partir do uso do hidrogênio em seu estado de líquido criogênico em *networked airports*¹⁰, nos quais as aeronaves realizariam voos entre os aeroportos em conexão adotando apenas o combustível limpo para uso.

Como tratado nos estudos para armazenamento do hidrogênio líquido nos aeroportos realizados por Brewer (1976), Boeing (1976) e Thibault (1979), foi visto como melhor opção a utilização de vasos esféricos sobre a superfície (VERSTRAETE, 2009).

No projeto desenvolvido por Amy e Kunycky (2019), é calculado possíveis tanques de formatos esféricos que seriam utilizados para armazenamento do LH2 para 7 dias de funcionamento integral do aeroporto (LAX), e como resultado, se encontrou o valor de

¹⁰ Networked airports (aeroportos conectados) representa o complexo entre aeroportos que buscam um objetivo ou meta em comum (JORNAL CHINÊS DE AERONÁUTICOS, 2016).

93,20m de diâmetro, demandando então grande espaço do sítio aeroportuário (VERSTRAETE, 2009).

Para a correta armazenagem, é necessário que o combustível já esteja purificado, pois caso haja impurezas no líquido poderão se tornar sólidas nas temperaturas acima da liquefação travando o correto funcionamento do sistema armazenador (VERSTRAETE, 2009).

Diante das condições para a eficiente atuação, o sistema de refrigeração contaria para melhor isolamento e diminuição de troca de calor com ambiente externo, de coolers para que auxiliasse os tanques a manter a baixa densidade, ideal pressão e temperatura. A utilização dos coolers ao invés de sistemas mais complexos para resfriamento resulta na redução considerável do custo para a infraestrutura (AMY & KUNYCKY, 2019).

O ideal seria que a produção e liquefação (transformação do estado gasoso para líquido criogênico) ocorressem no próprio aeroporto, pois assim, evitaria perdas possíveis de energia na transformação de estado da matéria e aumento de custos para utilização (AL-MUHAISH et al, 2014).

Entretanto, o plano utópico é inviável em diversos cenários por limitantes de área (VERSTRAETE, 2009) e, portanto, é abordada a opção de transporte do líquido criogênico no estudo de caso realizado em Los Angeles já em 2019.

Na capacidade de haver a entrega do combustível diretamente para o aeroporto, quando não o for produzido e consumido no mesmo local, é apresentado a possibilidade do uso de *vacuum-jacketed lines*¹¹, que são tubulações utilizadas para transferência de gases super-resfriados na forma líquida, porém se limita a distâncias de até 70km e, portanto, na entrega do hidrogênio em estado gasoso viabilizou-se a utilização de dutos subterrâneos para transporte em larga escala apesar de necessitar transformação de estado (gasoso para líquido) após sua entrega no destino (BREWER, 1991).

Nas locomoções que ultrapassem distâncias de até 70 km, foi-se levantado o plano de uso de *railroad supertankers*¹² por resultarem em um maior custo eficiência (BREWER, 1991), entretanto, a grande exposição com ambiente externo e propício troca de calor

¹¹ Vacuum-jacketed lines são linhas de tubulações utilizadas para transferência de gases líquidos super resfriados (TECHNI FAB, 2019).

¹² Railroad supertankers são supertanques carregados por trens para o transporte de óleos voláteis (WTTW, 2014).

inviabilizou o desenvolvimento do planejamento operacional (VERSTRAETE, 2009).

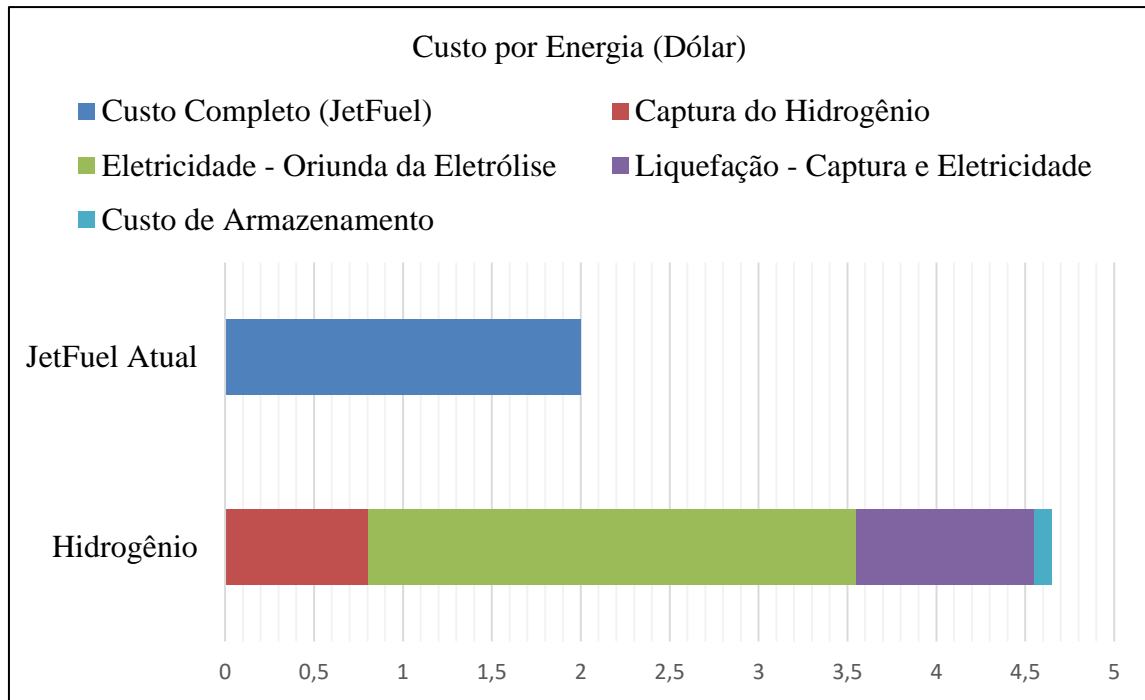
Na opção de utilização de oleodutos convencionais tratadas pelo artigo de Amy e Kunycky (2019), há a inviabilidade, pois não há compatibilidade com o hidrogênio, sendo necessário evitar o contato do elemento com aços e só sendo possível o uso com modificações na infraestrutura existente o que poderia demandar alto custo e tempo (SHERIF et al, 2003). No caso de oleodutos modernos, já há o transporte do H₂ para refinarias, tendo dimensões relevantes de 1500 km na Europa e 2000 km nos EUA.

Na possibilidade do uso de tanques ou caminhões para transporte em seu estado criogênico, é utilizado da compressão ou liquefação para assegurar o estado da matéria (AMY & KUNYCKY, 2019). Com o uso da compressão há perda de 6-15% da energia contida, enquanto que no uso da liquefação e resfriamento (cooling), há perda de aproximadamente 30% da energia contida (COOK et al, 2018).

Com a já existência de *commercial liquid hydrogen trucks*¹³ e capacidade de locomover 4300kg do hidrogênio por veículo, é simulado no projeto de caso em LAX o seu uso apesar de seu preço alto por unidade do caminhão. É estimado que para a locomoção do tanque para a aeronave, será gasto 10 minutos e mais 10 minutos será gasto para abastecimento e, portanto, para que se mantenha a operação normal seriam necessários pelo menos vinte caminhões em funcionamento durante todo o tempo. Como parte dos ressaltos do artigo, é explicitado o custo (dólar por GGE¹⁴) para uso do hidrogênio ao invés do derivado do petróleo, sendo esse custo o dobro com as atuais tecnologias e incentivos políticos (AMY & KUNYCKY, 2019).

¹³ *Commercial liquid hydrogen trucks* são caminhões que possuem a capacidade de transportar o hidrogênio em seu estado líquido (HYZON MOTORS, 2021).

¹⁴ GGE se trata de um método de comparação de produção de energia de combustíveis alternativos com a gasolina, no qual equivale a capacidade energética da gasolina vs combustível alternativo e então, mede-se os custos (NH CLEAN CITIES, 2017).

Gráfico 1 – Custo de utilização “Hidrogênio versus JetFuel”

Fonte: Amy & Kunycky, 2019. p. 15. Hydrogen as a Renewable Energy Carrier for Commercial Aircraft. (Tradução do autor)

Apesar do custo para utilização do hidrogênio ser duas vezes maior que o atual combustível, a concepção de utilizar-se uma fonte limpa e abundante não é descartada pela possibilidade de exploração de subsídios políticos e ambientais, para que se torne viável não apenas financeiramente a troca do atual combustível fadado ao término (AMY & KUNYCKY, 2019).

4 A GEOPOLÍTICA NA ECONOMIA DO HIDROGÊNIO

Para Pena (2018), geopolítica pode ser definida como o conjunto de ações e práticas realizadas no âmbito do poder, geralmente envolvendo os Estados Nacionais no sentido de promover o gerenciamento e o controle de seus territórios.

Na atualidade, tensões enfrentadas por líderes de Estados recaem muitas vezes à pauta de viés energético: a abundância de recursos resulta numa influência geopolítica, enquanto que a falta de recursos revela uma fragilidade na estrutura como Estado (DE

BLASIO & PFLUGMANN, 2020).

Com a renovação do interesse à utilização do hidrogênio como fonte de energia, gerou-se diversas análises em torno das consequências geopolíticas a serem enfrentadas com o desenvolvimento de estudos desta nova fonte energética (HAFNER et al, 2021).

Devido a tendência de alteração ideológica em torno da questão ambiental, os países influentes nos grupos da ONU (Organização das Nações Unidas) e G20 (Grupo dos 20) criaram um plano de descarbonização no início do século XXI para ser executado, pensando em uma transição não de forte choque ao estilo de vida já dotado (HAFNER et al, 2021).

Com este planejamento, considera-se que fontes renováveis são encontradas ao redor de todo o globo, representando assim, uma oportunidade para término de hegemonia dos Estados ricos em recursos e início de democratização do panorama energético global (DE BLASIO & PFLUGMANN, 2020).

Porém, com a rivalidade criada acerca da possível alteração do cenário de produção de energia entre os Estados, cria-se um ambiente de tensionamento no aspecto geopolítico respectivo ao grande potencial e múltiplas aplicações do hidrogênio como matriz energética (HAFNER et al, 2021).

Muitos países fazem do uso da energia uma arma geopolítica (DE BLASIO, 2021) e juntamente do embate tecnológico e da corrida pelo conhecimento sobre as formas de manuseio do composto de ótimas capacidades de produção energética (H₂), poderá acarretar então em uma alta competitividade entre países e companhias privadas (HAFNER et al, 2021).

Com a expansão da cadeia de valor do H₂, cria-se trade-offs¹⁵ (contrapartidas) e dilemas acerca da alteração econômica resultante (GRAAF et al, 2020).

Por isto, governos que importam e exportam energia, fornecedores de energia renovável, indústrias de produção de gás, companhias de gás e óleo, entre outros influenciados pela mudança de força motriz, encontram-se com questionamentos a serem respondidos de forma exata e eficiente.

¹⁵ *Trade-offs* são situações na qual há de ser escolhido uma opção que ao ser escolhida, negativa as demais (SUNO, 2018).

Tabela 1 – Questionamentos para trajetória do Hidrogênio como Energia

Caminhos Chave	
Do que produzi-lo?	Hidrogênio Azul ou Verde?
Onde produzi-lo?	Importação ou Cultivo em Casa?
Como manuseá-lo?	Derivados ou Hidrogênio Puro?
Para o que usá-lo?	Uso selecionado ou Sociedade do Hidrogênio?
Onde consumi-lo?	Exportação ou Industrialização?

Fonte: GRAAF *et al*, 2020; p.2. *The new oil? The geopolitics and international governance of hydrogen*.
(Tradução do autor)

Com as opções de trajetórias a serem seguidas, resulta-se no brainstorming¹⁶ não organizado por vezes para desenvolvimento de projetos.

O papel da geopolítica explicita-se com o embate entre industrial players¹⁷, como por exemplo, fabricantes de carros elétricos versus fabricantes de células de combustível (GRAAF *et al*, 2020), sendo então requerido medidas estatais para manutenção de seus grupos estratégicos e administração territorial.

Apesar da possível demanda e capacidade de fornecimento, há o receio de investimento na infraestrutura da cadeia do hidrogênio, sendo que lhe é necessário para diminuição de custos.

Os países que o realizara terão por crença o ganho significativo de visibilidade, estabilidade e inovação mercantil, entretanto, por estes serem caracterizados como Estados bem industrializados necessitam de alta oferta de energia e, portanto, é posto em balança a opção de importação em larga escala contra custos e benefícios da produção interna de energia a partir do H2 (GRAAF *et al*, 2020).

Por esta condição existente, territórios com abundantes recursos para produção do mesmo com baixo custo podem se tornar grandes exportadores, ganhando visibilidade no cenário econômico mundial e podendo atrair para seu mercado interno indústrias de derivados (como a de ferro e aço) (GRAAF *et al*, 2020).

¹⁶ *Brainstorming* é a idealização de um conjunto de ideias expostas de forma desordenada, sendo posteriormente ordenado para melhor desenvolvimento de projeto (PAULUS & PUTMAN, 2011).

¹⁷ *Industrial players* são jogadores (Estados) que possuem grande influência no setor industrial, ditando regras e tendências (DEFINITIONS, 2018).

Consequentemente, como abordado no artigo de Graaf et al (2020) na revista *Energy Research & Social Science*, cria-se então três implicações geopolíticas. São elas: a criação de dependência energética entre os Estados caso a importação for escolhida, mudança dos protagonistas e olheiros na transição de matriz energética e possível intensificação de rivalidade tecnológica e geoeconômica entre países.

No atual cenário, encontramos Ásia e Europa como os principais continentes de criação de demanda (HAFNER et al, 2021). No caso do continente asiático, se destaca o Japão sendo o *frontrunner*¹⁸ na economia do hidrogênio, tendo se despontado a frente em 2019 com uma atualização nas suas rotas estratégicas para condução de H₂ e células de combustível (HAFNER et al, 2021). Por haver grande dependência na importação de energia produzida a partir de combustíveis fósseis, busca desde 2011 com o acidente com a usina de Fukushima, obter geração energética sustentável (HAFNER et al, 2021).

Ainda no extremo lado oriental, diferentemente do Japão, a China tornou seus investimentos de uso imediato e, apesar de apresentar menor investimento em R&D¹⁹ (research & development), conseguiu focar a tecnologia no setor de transporte. No artigo intitulado “The Role of Green and Blue Hydrogen in the Energy Transition”, se faz presente o dado de que no ano de 2020, a China anunciou seu plano para se alcançar o *carbon-neutrality*²⁰. Por representar um terço da produção mundial de hidrogênio, há o constante investimento no meio de produção desta, entretanto, a mesma é realizada de forma não limpa sendo oriunda de carvão mineral.

Pelo desbravamento tecnológico apresentado, países dotados de grandes tecnologias e arsenal de pesquisa, executaram a pesquisa para a estimada demanda de matéria prima de energia renovável. A aliança chinesa de hidrogênio, em seu estudo estima que em 2040 a demanda será de 45 milhões de toneladas do elemento, sendo esta demanda crescente para o ano de 2050, chegando a 60 milhões de toneladas (HAFNER et al, 2021).

Torna-se identificável as diferentes estratégias para uso do composto. Enquanto no

¹⁸ *Frontrunner* por definição é o líder ou participante favorito para chance de vitória em uma corrida (COLLINS DICTIONARY, [s.d]).

¹⁹ R&D se trata de atividades que uma companhia/organização assume visando a descoberta de informações a partir de pesquisas para inovações e/ou desenvolvimento (INVESTOPEDIA, 2021).

²⁰ *Carbon-neutrality* representa a ideologia na qual se existe equilíbrio entre a emissão e absorção de carbono na atmosfera, evitando o acúmulo e posteriormente, aquecimento na camada causado pelo mesmo (EUROPEAN PARLIAMENT, 2021).

continente europeu se prefere a produção de forma limpa (verde), no mercado asiático é preferido a produção de fontes não limpas (cinza e azul). Fato este, que expressa a possibilidade mercantil de utilização, podendo ser focado para uso nacional/doméstico (fabricação limpa) ou para exportação e uma menor redução de descarbonização (fabricação a partir de fontes não limpas) (HAFNER et al, 2021).

Na Europa, a União Europeia publicou sua estratégia de mercado para hidrogênio na metade do ano de 2020. Em seu plano, é selecionado o método verde de uso do hidrogênio, visando redução otimizada da emissão de carbono, ainda que por se tratar de um meio caro de utilização, é estimado um investimento por parte pública e privada de até 470 bilhões de euros até 2050 (HAFNER et al, 2021).

No relatório produzido pela Universidade de Harvard e intitulado “Geopolitical and Market Implications of Renewable Hydrogen: New Dependencies in a Low-Carbon Energy World”, o mapa global é dividido em 5 grupos para discorrimento dos impactos geopolíticos embarcados em cada um deles. Cada grupo é dividido em detrimento de sua capacidade natural e a desenvolvida para um mercado de energia limpa, a partir do H2. (Vide Anexo 1).

O grupo 1 se trata dos países que possuem capacidade de serem campeões de exportações, pois contam com vasta energia renovável, recursos hídricos e infraestrutura. O grupo 2 se trata das nações que possuem abundantes recursos para renováveis, boa infraestrutura, porém limitados pela parte hídrica (DE BLASIO & PFLUGMANN, 2020).

O grupo 3 se trata dos territórios que são limitados por potencial de renováveis e/ou espaço disponível, porém com bom potencial de infraestrutura. O grupo 4 se trata dos Estados com bom potencial de recursos hídricos e renováveis, boa infraestrutura e potencialmente autossuficientes na questão energética (DE BLASIO & PFLUGMANN, 2020).

O grupo 5 se trata dos países com abundância em recursos, porém limitados devido à baixa infraestrutura desenvolvida (DE BLASIO & PFLUGMANN, 2020).

Estados alocados ao grupo 1, possuem grande vantagem aos demais. No caso da Austrália, por exemplo, pelo reconhecimento de sua capacidade e buscando estratégia mercantil, há realizado o aumento de investimentos para produção doméstica de hidrogênio,

visando o pódio de major player²¹ até 2030 (DE BLASIO & PFLUGMANN, 2020).

No caso dos territórios que se encaixam ao grupo 2, o desafio da limitação pela água deve ser analisado de forma a contorná-lo de forma eficaz. Na situação encontrada na China, esta limitante se dá pelo crescimento de utilização hídrica nas indústrias e, portanto, se encaixa como ameaça ao paradigma energético nacional. Como consequência de sua alta demanda, o país necessitaria produzir e importar H₂, sendo então, dependente de produção alheia (DE BLASIO & PFLUGMANN, 2020).

Países ambientados com o cenário do grupo 3 possuem relevantes embates geopolíticos internos. Por serem limitados por natureza, necessitariam de importações constantes para que continuassem seus funcionamentos, embora que se busque a menor dependência sobre outros Estados.

Entretanto, pelo grupo se tratar grande parte de países que lideram na descarbonização, praticam políticas internas de crescimento dos sistemas e setores do hidrogênio renovável.

No caso de estudo do Japão executado por De Blasio e Pflugmann (2020), há a busca por viabilização da produção nacional através da diminuição de custos e melhora de eficácia, resultando na hydrogen-based society²² e dependência controlável com países de grande potencial de produção, como Austrália.

O grupo 4 possui cenário manuseável, dificultando explosões de conflitos geopolíticos. Os agrupados possuem a capacidade de se suprirem com uma produção doméstica de hidrogênio, sendo possível a complementação energética através de importação sob à análise de custos (DE BLASIO & PFLUGMANN, 2020).

Por serem limitados ambientalmente e não serem abeis de competição pelo pódio de exportadores, buscam a estabilidade de produção nacional e em bons cenários, a exportação regional (DE BLASIO & PFLUGMANN, 2020).

A situação enfrentada no grupo 5 é de países que possuem limitada infraestrutura, como o Brasil. No caso destes, a vasta disponibilidade de recursos se torna inutilizável e por isto, os custos se tornam altos e inviáveis. Fator também a ser considerado é a grande

²¹ *Major player* é uma pessoa ou companhia que exerce papel mais importante em determinada área (GYMGLISH, [s.d]).

²² *Hydrogen-based society* é o conceito que trata de uma sociedade que é alimentada energeticamente a partir da fonte do hidrogênio, buscando o abandono de combustíveis fósseis (LEXOLOGY, 2019).

extensão territorial, pois com este torna mais complexo a consolidação de uma infraestrutura que cubra a demanda (DE BLASIO & PFLUGMANN, 2020).

Para De Blasio (2021), se torna evidente que legisladores, investidores, e demais stakeholders²³ necessitam de dados sobre economia, meio ambiente e implicações de viés político resultantes do hidrogênio renovável, para que há a criação de planos estratégicos de desenvolvimento e implementação destes (DE BLASIO, 2021).

Por se tratar de uma indústria ainda em início, os países devem iniciar a alteração de panorama energético por foco em inovações e/ou planos pilotos, interligando-os com políticas de incentivo para alcançar o ponto no qual as tecnológicas necessárias para a utilização desta fonte renovável tenham seus custos competitivos com as demais (DE BLASIO, 2021).

No artigo “The Role of Clean Hydrogen for a Sustainable Mobility” publicado pela Universidade Harvard no ano de 2021 são citadas políticas de incentivo que tornariam a adoção de utilização do hidrogênio como grande produtor energético mais viável, sendo elas:

- a) Estabelecimento de um papel para o hidrogênio em estratégias de energia a longo prazo no cenário doméstico e internacional, levando em conta as implicações geopolíticas e mercantis;
- b) Implementação de suporte por políticas que viabilizassem o sucesso de metas low-carbon²⁴ para estimular demanda comercial para esta fonte limpa;
- c) Expor riscos dos investimentos, especialmente aos primeiros a realiza-los, como também estabelecer prazos de duração para tais, como forma de garantia e transparência;
- d) Focar em novas aplicações possíveis do elemento como energia, fornecimento e projetos de infraestrutura;
- e) Apoiar pesquisas e esforços para desenvolvimento público e privado através de parcerias para acelerar os ciclos de inovação; e

Diminuição de burocracia quanto à certificação de sistemas e regulamentações para

²³ *Stakeholders* representam partes que possuem interesse e/ou influência na atividade de terminada empresa ou companhia (INVESTOPEDIA, 2021).

²⁴ *Low-carbon*, baixos índices de dióxido de carbono na atmosfera (EDF ENERGY, 2020).

produção de livre de carbono do hidrogênio.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

É possível compreender que a troca do combustível, oriundo do petróleo pelo combustível alternativo – hidrogênio, na aviação é realizável. A firmiação da tecnologia necessária para o motor aeronáutico apresenta preparo para a mudança quando imperiosa. Com a alteração dos aspectos ideológicos a serem difundidos sobre o *eco-friendly*, é de grande facilitação ao modal aéreo já ter realizado avanços no caminho da utilização deste recurso limpo.

As vantagens para aeronaves ao utilizarem é de parte à longo prazo, tendo apenas a diminuição do consumo e possibilidade de maior carga a bordo sendo de curto ou instantâneo prazo. Ademais, tornar menos dependente à um único meio de alimentação é de importância com a ciência do término do recurso atual. No que tange à infraestrutura necessária, é cimentado de que se há inúmeras formas para que ocorra esta alteração, apesar de requerer alterações em toda a gama aeroportuária.

De fluxo contrário à viabilização, a geopolítica apresenta um tensionamento difícil a ser vencido.

O receio de criações de conflitos maiores pela mudança de todo um panorama energético é evidenciado, tornando esta possível alteração de forma lenta e sucessiva. Por se esperar o esgotamento do petróleo para a troca, faz-se que não haja intenções de facilitar e incentivar o desenvolvimento de produção, e utilização, do recurso limpo.

Destarte, apesar de já ser possível a realização de projetos em todo o modal aéreo utilizando-se do hidrogênio como combustível, é inviável financeiramente, uma vez que os altos custos de produção, transporte, armazenamento e infraestrutura para o uso seja de valor nas tomadas de decisões.

Portanto, se faz necessário à implementação de políticas de incentivo que possam tornar a alteração no panorama energético viável, concomitantemente, os tensionamentos entre os Estados devem ser gerenciados para que não haja a descompensação de poder ou a criação de dependência como resultado desta troca.

Por fim, até o presente momento da investigação observou-se a não viabilização de

grandes projetos na aviação utilizando-se do hidrogênio à curto prazo. Porém, com a aparição de novas questões acerca da escassez do petróleo, há de serem analisadas as criações de novas modalidades que possuam o condão de tornar o uso dos combustíveis alternativos de menor custo. Portanto, há de serem frutíferas face às expectativas do cenário das pesquisas futuras.

REFERÊNCIAS

AAKKO-SAKSA, Päivi T.; COOK, Chris; KIVIAHO, Jari; *et al.* Liquid organic hydrogen carriers for transportation and storing of renewable energy – Review and discussion. **Journal of Power Sources**, v. 396, p. 803–823, 2018.

AMY, Caleb; KUNYCKY, Alex. **Hydrogen as a Renewable Energy Carrier for Commercial Aircraft**. 2019. Disponível em: <http://arxiv.org/abs/1910.05632>. Acesso em: 14 de outubro de 2021.

BALAT, Mustafa. Potential importance of hydrogen as a future solution to environmental and transportation problems. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 33, n. 15, p. 4013–4029, 2008.

BARBIR, Frano. Fuel cells and hydrogen economy. **Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly**, v. 11, n. 3, p. 105–113, 2005.

C. STILLER; P. SCHMIDT. **18TH World hydrogen energy conference 2010 : WHEC 2010 proceedings**. [s.l.]: Forschungszentrum Jülich, 2010.

CONTRERAS, A.; YIĞIT, S.; ÖZAY, K.; *et al.* Hydrogen as aviation fuel: A comparison with hydrocarbon fuels. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 22, n. 10–11, p. 1053–1060, 1997.

Crise do Petróleo - Economia - InfoEscola. Disponível em: <https://www.infoescola.com/economia/crise-do-petroleo>. Acesso em: 10 de novembro de 2021.

CORCHERO, G.; MONTAÑÉS, J. L. An approach to the use of hydrogen for commercial aircraft engines. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering**, v. 219, n. 1, p. 35–44, 2005.

DE BLASIO, Nicola. **Geopolitical and Market Implications of Renewable Hydrogen: New Dependencies in a Low-Carbon Energy World Geopolitics of Nuclear Power and Technology**. [s.l.: s.n.], 2020. Disponível em: <www.belfercenter.org/ENRP>.

DE BLASIO, Nicola. **The Role of Clean Hydrogen for a Sustainable Mobility Article in Sustainable Energy**. [s.l.: s.n.], 2021. Disponível em: <www.belfercenter.org/ENRP>.

DEMIRBAS, Ayhan. Biomass Gasification for Power Generation in Turkey. <https://dx.doi.org/10.1080/009083190913584>, v. 28, n. 5, p. 433–445, 2006. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/009083190913584>. Acesso em: 22 de setembro de 2021.

DUFFY, Paul; KANDALOV, A. I. **Tupolev: The Man and His Aircraft - Paul Duffy, A. I. Kandalov - Google Livros**. Disponível em: https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=fOC7li5SgZUC&oi=fnd&pg=PA9&dq=DUFFY++KANDALOV+1996&ots=EAucr8JM6_&sig=7b5j2_Hffo3o3dCT3G92gGbuCKg#v=onepage&q=DUFFY KANDALOV 1996&f=false. Acesso em: 04 de novembro de 2021.

FREIRE, Leandro. **CÉLULAS A COMBUSTÍVEL E HIDROGÊNIO COMO FONTE DE ENERGIA**. 2012.

HILLER, Aline. **O QUE É GEOPOLÍTICA? E GEOGRAFIA POLÍTICA**. [s.l.: s.n., s.d.].

KATIKANENI, Sai P.; AL-MUHAISH, Fahad; HARALE, Aadesh; *et al.* On-site hydrogen production from transportation fuels: An overview and techno-economic assessment. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 39, n. 9, p. 4331–4350, 2014.

NOUSSAN, Michel; RAIMONDI, Pier Paolo; SCITA, Rossana; *et al.* The role of green and blue hydrogen in the energy transition—a technological and geopolitical perspective. **Sustainability (Switzerland)**, v. 13, n. 1, p. 1–26, 2021.

NOUSSAN, Michel; RAIMONDI, Pier Paolo; SCITA, Rossana; *et al.* The Role of Green and Blue Hydrogen in the Energy Transition—A Technological and Geopolitical Perspective. **Sustainability 2021, Vol. 13, Page 298**, v. 13, n. 1, p. 298, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/1/298/htm>. Acesso em: 30 de setembro de 2021.

RABAEY, Korneel; CLAUWAERT, Peter; AELTERMAN, Peter; *et al.* Tubular Microbial Fuel Cells for Efficient Electricity Generation. **Environmental Science and Technology**, v. 39, n. 20, p. 8077–8082, 2005. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es050986i>. Acesso em: 13 de novembro de 2021.

RABAEY, Korneel; CLAUWAERT, Peter; AELTERMAN, Peter; *et al.* Tubular microbial fuel cells for efficient electricity generation. **Environmental Science and Technology**, v. 39, n. 20, p. 8077–8082, 2005.

RABINOWITZ, Jason. Last Tupolev TU-154 Delivered – 16 Years After Production Ceases. **Airline Reporter**, 2013. Disponível em: <http://www.airlinereporter.com/2013/02/last-tupolev-tu-154-delivered-today-six-years-after-production-ceases/>. Acesso em: 15 de outubro de 2021.

REIMAN, Adam. **AMC 's Hydrogen Future : Sustainable Air Mobility**. 2009.

RODRIGUES DE OLIVEIRA, Ana Camila. O Uso Do Hidrogenio Como Fonte Energética. **Encontro Nacional de Engenharia de Produção**, p. 1–13, 2011.

SERGEANT, Craig D.; OTT, Ingo; SNIADY, Adam; *et al.* Metallo-nucleosides: synthesis and biological evaluation of hexacarbonyl dicobalt 5-alkynyl-2'-deoxyuridines. **Organic & Biomolecular Chemistry**, v. 6, n. 1, p. 73–80, 2007. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2008/ob/b713371e>. Acesso em: 15 de novembro de 2021.

SHERIF, S A; BARBIR, F; VEZIROGLU, T N. Principles of Hydrogen Energy Production, Storage and Utilization. **Journal of Scientific & Industrial Research**, v. 62, p. 46–63, .

SORDI, Alexandre; LOBKOV, Dmitri D; NETO, Antônio J Marin; *et al.* **Gaseificação de biomassa e célula a combustível: sistema com célula tipo pemfc**. 2016.

SOUZA, Antonio Carlos Caetano de. Análise técnica e econômica de um reformador de etanol para produção de hidrogênio. **Aleph**, p. 139 f. : il., 2005. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/99338>. Acesso em: 02 de novembro de 2021.

THALE DE ANDRADE. A economia do hidrogênio. Jeremy Rifkin. São Paulo, M. Books, 2003, 301 p. **Ambiente & Sociedade**, v. 5, n. 2, p. 223–226, 2003.

VAN DE GRAAF, Thijs; OVERLAND, Indra; SCHOLTEN, Daniel; *et al.* The new oil? The geopolitics and international governance of hydrogen. **Energy Research & Social Science**, v. 70, p. 101667, 2020.

VAN ZON, Nout. **Liquid Hydrogen Powered Commercial Aircraft Analysis of the technical feasibility of sustainable liquid hydrogen powered commercial aircraft in 2040 Liquid Hydrogen Powered Commercial Aircraft**. Disponível em: <http://www.spaceforinnovation.nl>. Acesso em: 10 de novembro de 2021.

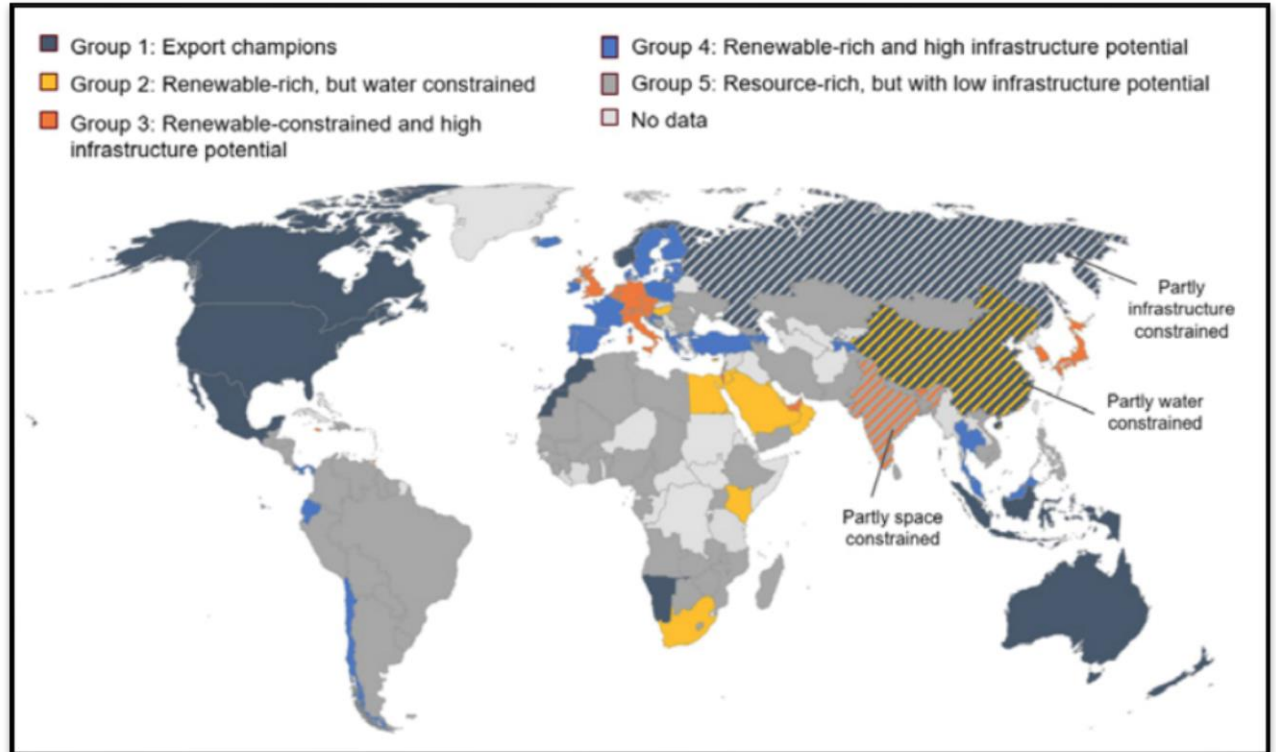
VERSTRAETE, Dries. **The Potential of Liquid Hydrogen for long range aircraft propulsion SCHOOL OF ENGINEERING**. [s.l.: s.n., s.d.].

ZHENG, Hang; O’SULLIVAN, Cathryn; CLARKE, William; *et al.* **World Hydrogen Energy Conference 2010 – WHEC 2010 Proceedings**. [s.l.: s.n.], 2010.

ZHURAVLEV, Vladimir N. **COMPARATIVE ANALYSIS OF RUSSIAN AND WESTERN APPROACHES TO THE PROBLEM OF ALTERNATIVE FUEL USAGE IN AVIATION**. [s.l.: s.n., s.d.]

ANEXO 1

Mapa Global dividido por grupos para atuação do Hidrogênio



Fonte: DE BLASIO & PFLUGMANN, 2020. p.32. *Geopolitical and Market Implications of Renewable Hydrogen: New Dependencies in a Low-Carbon Energy World.*

Sobre os autores

Bruno Garcia Marins - Graduado em Ciências Aeronáuticas pela Pontifícia Universidade Católica de Goiás - PUC GO. E-mail: brunom20@icloud.com.

Humberto César Machado - Pós Doutor em Psicologia pela PUCGO (2016); Doutor em Psicologia pela PUC GO (2013); Mestre em Psicologia pela PUC GO (2006), Especialista em História pela UFG (2002), Graduado em Filosofia pela UFG (1996), Graduado em Pedagogia pela ISCECAP (2018), Graduado em Letras pela FAFIBE (2019), Elemento Credenciado Fatores Humanos e Prevenção de Acidentes Aéreos pelo CENIPA, Professor Coreógrafo e Dançarino de Salão; Membro do Comitê de Ética e Pesquisa e Professor da UNIFAN e professor da PUCGO, e-mail: humberto.cesar@hotmail.com.

Recebido: 24 fev. 2022

Aceito: 02 ago. 2022