



DEFESA VERDE: DESCARBONIZANDO AS FORÇAS ARMADAS

Green defense: decarbonizing the armed forces

Marcus Vinicius Gonçalves da Silva

Exército Brasileiro | Comando Militar da Amazônia

E-mail: marvin.gsilva@gmail.com

RESUMO

As mudanças climáticas estão na ordem do dia e eventos nacionais e internacionais têm acelerado as discussões sobre o tema de forma intensa, e pesquisadores da área de Defesa têm realizado estudos sobre como as alterações climáticas irão acentuar a insegurança e gerar conflitos armados em todo o mundo. Nesse ínterim, o termo descarbonização encontra-se em evidência em vários setores da indústria, transporte e geração de energia. A pesquisa realizada apresenta uma contribuição de investigação original ao nível das estratégias de descarbonização das Forças Armadas (FA) consideradas líderes em todo o mundo. Para tanto, utiliza-se de uma metodologia de caráter qualitativo, descriptivo e bibliográfico. Qualitativo, pois não há a intenção de generalizar os resultados de maneira probabilística, mas busca descrever fenômenos, situações e contextos, explicando como são e se manifestam. Bibliográfica, pois utiliza-se de material publicado em livros, documentos, revistas e sítios eletrônicos. Os resultados apontam que: i) com a escalada da crise climática e a transição energética global, a Organização do Tratado do Atlântico Norte (OTAN) a União Europeia (UE) e a Forças Armadas Orientais, passaram a colocar na agenda de discussões, medidas para a diminuição do uso de combustíveis fósseis, ii) as iniciativas das FA são incipientes e cercadas de incertezas; e, iii) as FA de alguns países carecem de conhecimento sobre o processo de produção de energia de hidrogênio e seus benefícios, suscitando preocupações sobre a consistência da sua exploração e o impacto na eficácia das operações militares.

Palavras-chaves: Defesa, Descarbonização, Forças Armadas, Sustentabilidade, Hidrogênio

ACEITO EM: 23/04/2025

PUBLICADO EM: 20/06/2025



YAMK

UTM



TAHRIRIYE UNIVERSITY

Universidad
de Tucumán



GREEN DEFENSE: DECARBONIZING THE ARMED FORCES

Defesa verde: descarbonizando as forças armadas

Marcus Vinicius Gonçalves da Silva
Exército Brasileiro | Comando Militar da Amazônia
E-mail: marvin.gsilva@gmail.com

ABSTRACT

Climate change is at the forefront of global discussions, with national and international events intensifying the discourse on the topic. Researchers in the Defense sector have been conducting studies on how climate change will exacerbate insecurity and lead to armed conflicts worldwide. Meanwhile, the term decarbonization is gaining prominence across various sectors including industry, transportation, and energy generation. The conducted research presents an original investigative contribution regarding the decarbonization strategies of the Armed Forces (AF), considered leaders worldwide. For this purpose, a qualitative and bibliographic methodology is employed. Qualitative, as there is no intention to generalize results probabilistically, but rather to describe phenomena, situations, and contexts, explaining how they are and manifest themselves. Bibliographic, as it uses material published in books, documents, journals, and websites. The findings indicate that: i) with the escalation of the climate crisis and global energy transition, the North Atlantic Treaty Organization (NATO), the European Union (EU), and Eastern Armed Forces have begun to include measures to reduce fossil fuel usage in their discussions; ii) AF initiatives are in their infancy and surrounded by uncertainties; and, iii) AF from some countries lack knowledge about the hydrogen energy production process and its benefits, raising concerns about the consistency of its exploration.

Keywords: Defense, Decarbonization, Armed Forces, Sustainability, Hydrogen

INTRODUÇÃO

O cenário de segurança energética que prevemos para 2050 será diferente do de hoje, e satisfazer as futuras necessidades energéticas das Forças Armadas (FA) será um desafio fundamental, sobretudo para os militares. Desse modo, Ministérios da Defesa ocidentais têm aceitado a hipótese de que a queima de carbono para criar “poder de fogo” não é mais sustentável se os compromissos da comunidade internacional em matéria de alterações climáticas e as metas de emissões líquidas zero ou *net zero* forem cumpridas (Dalby, 2018).

Para o General Stoltenberg, Secretário-Geral da OTAN, “não podemos escolher entre forças armadas verdes ou fortes, precisamos de forças armadas fortes e verdes ao mesmo tempo. Mas, estou absolutamente confiante de que, no futuro, os mais eficazes, os melhores aviões, os melhores navios, os melhores veículos militares, serão alimentados por algo diferente dos combustíveis fósseis (NATO, 2021).

O termo “guerra de baixo carbono” ou “guerra hipocarbônica”, sugerido por Depledge (2023), visa preencher as lacunas existentes nos estudos de Defesa, em relação as pressões que as FA têm sofrido sobre a descarbonização. Posto que, nessa temática, o termo “guerra” não é *stricto sensu*, as discussões incluem as operações militares de não-guerra, incluindo, por exemplo, o preparo e emprego das FA, como treinamentos e exercícios.

Nesse ponto, cabe ressaltar que enquanto a guerra continuar a ser materialmente destrutiva, ainda haverá um elevado custo a ser pago em termos ambientais, como o uso de carbono pelas FA (Darbyshire, 2021).

Atualmente, os debates sobre as consequências climáticas e ambientais, acadêmicos e militares buscam planejar suas estratégias sobre como as FA manter o estado de prontidão e a capacidade operacional, em um futuro em que o mundo caminha para zerar as emissões líquidas ou restringir o uso de combustíveis fósseis, com o diesel e a gasolina.

Este artigo não visa apresentar soluções definitivas para um problema complexo e multifacetado, mas tem o propósito de proporcionar uma visão ampla e diversificada, que possa servir como ponto inicial para a compreensão dos desafios e das oportunidades para o setor de defesa nacional no Brasil, analisando como outras nações lidam com os desafios resultantes da emergência climática e as lições absorvidas durante esse processo.

Portanto, parte-se do pressuposto de que a transição energética dentro das Forças Armadas e a proteção da sociedade civil diante das catástrofes climáticas são urgentes.

1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

1.1 Ecologização da Defesa

A emergência climática tem implicações para a segurança nacional e internacional (Depledge, 2023). Para Klare (2019), desde a década de 2000, o impacto das alterações climáticas sobre os ambientes operacionais militares tem suscitado o interesse de pesquisadores. Westing (2008) revela que juntamente com os óbvios efeitos ambientalmente destrutivos da guerra, alguns estudos destacam os impactos prejudiciais, em tempos de paz, que as FA causaram ao meio ambiente.

Depledge (2023) relata que a ideia de “ecologizar a defesa”

[...] ganhou força no início da década de 1990. O Departamento de Defesa (DOD) dos EUA foi compelido a enfrentar uma série de desafios ambientais e a pensar em soluções quanto ao uso de substâncias não prejudiciais à camada de ozônio, limpeza de antigas bases soviéticas contaminadas na Europa Oriental e Central e, até mesmo em salvaguardas ambientais nos locais de operações dos militares americanos (Depledge, 2023, p. 670, tradução livre).

Notavelmente, a questão das emissões de gases pelas FA foi levantada durante a negociação do Protocolo de Quioto de 1997 (Michaelowa e Koch, 2001) e, na década de 2000, os Ministérios da Defesa ocidentais sofreram crescentes pressões para reduzir as emissões, especialmente, nas instalações militares e nas frotas de veículos não-operacionais (Closson, 2013; Fiot, 2014).

As exigências energéticas das campanhas no Afeganistão e no Iraque, combinadas com o aumento dos preços do petróleo, deram destaque ao uso de combustíveis fósseis pelas FA ocidentais. Isto aconteceu num

contexto de preços elevados de energia, o que recrudesceu ainda mais a pressão sobre a OTAN e aliados para reduzirem o seu consumo energético (Samaras et al., 2019).

No entanto, o ceticismo de que a ecologização da defesa poderia restringir à eficácia das operações militares, desencorajou os estudiosos do pós-Guerra Fria, sobre as iniciativas para reduzir as pegadas de carbono. Ou seja, o interesse inicial das FA ocidentais no caminho da descarbonização teve vida relativamente curta, e pareceu ter um impacto limitado em termos de como os acadêmicos e profissionais viam o futuro das operações militares.

Embora o interesse em ecologizar a defesa não tenha se dissipado totalmente, o custo do uso do carbono nas operações militares permaneceu sem solução. Felizmente, mais adiante, a descarbonização constaria na pauta. No caso da Defesa Nacional, a Estratégia Nacional de Defesa (END) (Brasil, 2020), no capítulo que trata sobre o Ambiente Nacional, descreve que:

Para assegurar o atendimento à crescente demanda imposta pelo processo de desenvolvimento, é vital para o País possuir condições de **diversificar sua matriz de transporte, sua matriz energética e obter a autossuficiência das tecnologias necessárias para o pleno aproveitamento do seu potencial nuclear, hidrelétrico, solar, eólico e fóssil**, dentre outros (Brasil, 2020, p. 13, grifo do autor).

Ao tratar sobre os setores estratégicos, especificamente, sobre o setor nuclear, a END aponta para a necessidade de

[...] aprimorar as tecnologias e capacitações nacionais com vistas a qualificar o País a projetar e construir reatores de pesquisa, reatores de teste e termelétricas nucleares, ainda que desenvolvidas por meio de parcerias com outros países ou com empresas estrangeiras, **com o propósito de garantir a segurança energética**, por meio, inclusive, **da diversificação da matriz energética nacional** (Brasil, 2020, p. 59, grifo do autor).

A END de 2020 ressalta a natureza estratégica da infraestrutura energética do país, ao reconhecer a importância de se obter a autossuficiência nas tecnologias necessárias para o pleno aproveitamento do seu potencial na geração de fontes de energias renováveis.

1.2 A descarbonização do ocidente ao oriente: um breve relato

O Acordo de Paris, assinado em 12 de dezembro de 2015, por 195 nações, comprometeu os signatários a prosseguirem esforços para limitar o aumento médio da temperatura global a 1,5°C e, pela primeira vez, exigiu-se que todos os países estabelecessem compromissos ambiciosos de redução de emissões (Depledge, 2023).

Três anos mais tarde, o *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) da Organização das Nações Unidas (ONU), concluiu que as emissões globais dos GEE deveriam atingir o nível zero, por volta de meados do século, se quisermos que o mundo tenha uma possibilidade razoável de limitar o aquecimento médio a 1,5°C (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2018).

Em 2019, o Reino Unido tornou-se o primeiro país a transformar em lei o seu compromisso de zero emissões líquidas. Desde então, Canadá, Dinamarca, França, Hungria e Suécia seguiram o mesmo exemplo. Em dezembro de 2021, o presidente Joe Biden comprometendo o governo federal dos EUA a alcançar a neutralidade de carbono até 2050. Enquanto a China comprometeu-se a atingir o nível zero de emissões líquidas até 2060, enquanto a Índia estabeleceu uma meta para 2070 (Depledge, 2023).

Os compromissos do Acordo de Paris vieram a ser fortalecidos em Glasgow, no ano de 2021, momento que a comunidade internacional se comprometeu com um futuro de baixo carbono. No ano de 2022, a McKinsey & Company informou que mais de 5.000 empresas estabeleceram metas de zero emissões líquidas, como parte da campanha *Race to Net Zero* da ONU (McKinsey & Company, 2022). Além disso, na maior parte da Europa, todos os automóveis novos terão emissões zero a partir de 2035.

Outras organizações, como a *International Air Transport Association* (IATA), que abrange cerca de 82% do tráfego aéreo global, buscam comprometer os seus membros a atingir zero emissões líquidas até 2050 (Depledge, 2023). Esses dados revelam que as metas da comunidade internacional também estão causando impacto no setor comercial.

Para Owen-Burge (2021), as tecnologias que atualmente são sustentadas pela produção de combustíveis fósseis deverão diminuir, devido à transição global para emissões líquidas zero. Isto significa que, com o tempo, as tecnologias de queima de carbono poderão tornar-se cada vez mais difíceis de serem pesquisadas e desenvolvidas. Nesse quesito, Pfeifer (2021) afirma que a Base Industrial de Defesa (BID) europeia manifestou preocupação, pois o progresso em direção à descarbonização pode vir a afetar a capacidade do setor para obter investimentos futuros.

Pfeifer (2021, s.p., tradução livre) ao transcrever a fala de Charles Woodburn, executivo-chefe da BAE Systems, revela que a indústria está “sofrendo de falta de consenso na definição de conformidade com ESG, o que está fazendo com que alguns fundos de investimento excluam todas as ações de defesa, em vez de adotar uma abordagem mais ponderada para avaliar empresas individuais”.

Robert Stallard, analista da *Vertical Research Partners*, disse que o “ESG continua a ser um grande obstáculo para as empresas de defesa europeias, embora ainda não tenha atravessado o Atlântico. O setor como um todo foi colocado na “*blacklisted*” por muitos investidores europeus e, mesmo que as empresas de defesa replantassem a Amazônia, ainda estariam na “lista negra” (Pfeifer, 2021, s.p., tradução livre).

Percebe-se que os executivos americanos do setor de Defesa, habituados a serem alvos de manifestantes antiguerreiros, passaram a enfrentar um novo e diferente adversário – investidores socialmente conscientes.

Brzoska (2012) citado por Depledge (2023) observa que as FA chinesas também enfrentam pressão para reduzir as emissões de GEE e melhorar a eficiência energética. Em junho de 2022, Ministério da Defesa chinês publicou que o Exército de Libertação Popular estava a seguir

[...] resolutamente as instruções do Presidente Xi para tomar medidas mais rápidas para construir um sistema energético militar moderno, seguro, eficiente e sustentável, evidenciado pela forte promoção da utilização de novas energias, como a energia solar, a energia eólica, energia oceânica e energia de hidrogénio para fins militares (Depledge, 2023, p. 675, tradução livre).

No caso da Índia, as FA também têm explorado formas para reduzir as emissões de carbono, a fim de contribuir com os esforços nacionais de mitigação das alterações climáticas (Jayaram, 2021).

Embora não seja o caso de confundir intenções com resultados concretos, é notável que os governos dos quatro países com maiores orçamentos mundiais no setor de Defesa, juntamente com a OTAN e a UE a nível regional, manifestaram o interesse na descarbonização das FA e na prescrição de metas de emissões líquidas zero.

Tudo isso sugere que os Ministérios de Defesa ocidentais juntamente com suas BID, reconhecem que a transição global em curso para um futuro de baixo carbono deixou as FA exposta, ao mesmo tempo que a crise climática causará uma diversidade de impactos e de outras preocupações de segurança e Defesa nacional.

Assim, anteriormente, a redução das emissões de carbono era considerada como algo que precisava ser equilibrado com a eficiência operacional. Contudo, daqui para frente, a eficiência operacional poderá depender diretamente da redução das emissões de carbono.

1.3 Guerra de baixo carbono e o futuro das operações militares

Analizar os avanços recentes sob a perspectiva da guerra de baixo carbono proporciona uma maneira conveniente de lidar com essa lacuna. O ponto principal não é sugerir que a descarbonização definirá no futuro a característica das operações militares.

Em vez disso, argumenta-se que o termo “guerra de baixo carbono” expande o campo conceitual do estudo da guerra, a fim de incluir na pauta das discussões as implicações decorrentes da descarbonização. O tema é emergente nos estudos de Defesa, razão pela qual a academia deve gerar conhecimento e respostas para a mitigação dos adventos decorrentes da crise climática mundial, da transição energética global e das crescentes pressões para descarbonizar as FA.

Para alguns estudiosos como Barry et al. (2022), a descarbonização aponta mais para a redução do que para a transformação do poder militar. Como resultado, talvez não seja surpreendente que algumas intervenções tenham, até o momento, tido pouco impacto nos debates acadêmicos sobre a natureza mutável da guerra.

Muitos persistem em presumir que a descarbonização militar pode comprometer a eficácia operacional. Esta corrente de pensamento, defende que as FA, quando alimentadas por combustíveis fósseis, serão sempre superiores e devem, portanto, ser mantidas a todo custo.

Por outro lado, os defensores da guerra hipocarbônica apontam para a descarbonização como uma oportunidade para abolir a dependência militar dos combustíveis fósseis, a fim de obter vantagens operacionais e estratégicas as FA (Nugee, 2021).

Independentemente da corrente de pensamento, o ponto crucial é a pressão que as FA têm sofrido pelas comunidades internacionais, para seguir em direção à descarbonização, ou seja, não é algo isolado. No entanto, para Depledge (2023) argumenta que

[...] a agressão e a violência russa na Europa Oriental, que em 2022 se transformou numa guerra intensa e sangrenta contra a Ucrânia, e o aprofundamento da competição estratégica entre os Estados Unidos e a China, aumentou o risco de os aliados ocidentais serem atraídos para combater uma grande guerra – possivelmente até nuclear – guerra interestadual na Europa e/ou no Indo-Pacífico (Depledge, 2023, p. 680, tradução livre).

Após as tentativas da invasão Rússia à Ucrânia, as nações europeias anunciaram um aumento nos seus orçamentos de defesa de aproximadamente 200 mil milhões de euros (Finkbeiner & van Noorden, 2022). Embora, investimentos dessa ordem na área de Defesa, pudessem ser aplicados para acelerar a descarbonização, a pressão ameaça consolidar ainda mais a dependência da Europa na queima de carbono das FA.

A guerra hipocarbônica não é uma panaceia, porém em termos práticos, para que ocorra uma bem-sucedida descarbonização militar, e as decisões deverão ser moldadas por uma gama de fatores, o que necessariamente, deverá envolver toda a sociedade.

Contudo, para que se tenha algum impacto significativo da descarbonização nas operações das FA, em 2050, os planejamentos devem ser realizados o mais brevemente, e que estejam em consonância com as metas de redução de emissões de outros organismos internacionais.

2 MÉTODO

A metodologia neste trabalho foi orientada por uma abordagem qualitativa, descriptiva e bibliográfica, com o objetivo de explorar e compreender as experiências e perspectivas em relação ao fenômeno em estudo.

As informações analisadas foram retiradas do banco de dados do *Google Scholar* (GS), devido à ampla gama de periódicos disponíveis em uma única plataforma de busca, de caráter multidisciplinar.

Na busca, utilizou-se como critério de seleção, os artigos publicados no período de 2020 a 2023, digitando no campo de pesquisa os termos em inglês *military operations, armed forces, energy, decarbonization e net zero*.

A filtragem dos artigos foi realizada por *i) ordem de relevância e ii) artigos de revisão, e iii) qualquer idioma*. Após o resultado da busca, foram analisados somente os artigos que continham nas palavras-chaves os termos: *energy, decarbonization e net zero*, em combinação com um dos termos: *military operations e Armed Forces*. Feita essa criterização, o GS retornou apenas dois artigos com acesso aberto, ou seja, de periódicos que não cobram taxa para a leitura das publicações.

Dado o baixo retorno de artigos no GS, com os critérios estabelecidos, de forma intencional optou-se por ler os artigos contido nas referências dos artigos selecionados, os quais são: *Low-carbon warfare: climate change, net zero and military operations*, de Depledge (2023), publicado na *International Affairs* e, o artigo de Sobon et al. (2021), intitulado *Prospects for the Use of Hydrogen in the Armed Forces*, publicado no periódico *Energies*. Cabe destacar que a incipienteza de artigos sobre o tema, sugere o ineditismo deste estudo em relação à descarbonização das Forças Armadas brasileiras.

A leitura realizada na gama de artigos referenciados nesses dois artigos foi relevante para a fundamentação teórica deste trabalho, bem como para promover uma reflexão interdisciplinar sobre o tema proposto, conforme os resultados e discussões apresentados na Seção 3, a seguir.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Descarbonização das Forças Armadas

Depledge (2023) aponta que há um conjunto de questões a serem respondidas a respeito da descarbonização, como exemplo, se deve ser tratada como uma inovação disruptiva, repensando radicalmente sobre o *design* e a estrutura da força para reduzir a dependência em plataformas pesadas, como tanques, aviões e navios de guerra.

De forma prática, ao olharmos para fora do Brasil, vemos que apenas poucos países adicionaram o tema descarbonização nas suas estratégias de defesa ou definiram qualquer tipo de metas para as suas FA (Barry et al., 2022).

Certamente, Departamentos e Ministérios de Defesa de todo o mundo encontrarão desafios na tentativa de reduzir as emissões de carbono as quais são diretamente responsáveis, principalmente, devido aos longos ciclos de vida dos equipamentos. Isto significa que os equipamentos movidos a combustíveis fósseis em uso, atualmente, ou que em breve entrarão em operação, ainda estarão em funcionamento em 2050, consequentemente, sendo improvável que haja uma eliminação completa de todas as emissões na área de defesa até meados do século XXI (Depledge, 2023).

Um outro aspecto a ser observado é que as FA utilizam materiais e equipamentos exclusivos, sendo um fator a ser ponderado na criação de um ecossistema que possa gerar benefícios mútuos entre a Defesa e os seus fornecedores. Portanto, poderá ser mais eficaz abordar as emissões da cadeia de abastecimento estabelecendo requisitos de descarbonização alinhados com as metas nacionais para todos os fornecedores, em vez de quantificar as emissões diretamente e tentar ativamente reduzi-las.

Por mais temerário que seja o desafio da descarbonização, há muito que a Defesa pode fazer sem comprometer a sua eficácia, além de algumas mudanças poderem implicar e, melhorias operacionais ou de capacidades, tais como uma menor dependência das cadeias de abastecimento fósseis ou uma maior capacidade de alavancar as energias renováveis locais.

No caso da OTAN, uma das prioridades é aumentar a resiliência dos Estados e das suas FA no que diz respeito à continuidade do fornecimento de energia para operações militares. Ao mesmo tempo, a organização tem ampliado a proteção de infraestruturas críticas e rotas estratégicas de transporte de recursos energéticos (Ruszel, 2018).

Um processo progressivo de eletrificação que facilite uma transição energética baseada no compartilhamento setorial e na política climática são tendências reconhecidas pela OTAN, rumo à transformação de suas FA em conformidade com a sua política climática e energética.

Devido à proteção e o acesso restrito a alguns dados nas FA, nem todos os países fornecem informações sobre as emissões no setor, contrariando o que prescreve a Organização Internacional para Padronização (ISO) 14064, de 2006, quanto à necessidade de que todos os tipos de atividades e setores devam reportar as emissões provenientes de combustíveis fósseis e produção de energia (Weng & Boehmer, 2006).

Os esforços da OTAN baseiam-se, principalmente, na introdução de “tecnologias verdes” no setor de Defesa, que minimizarão a utilização de combustíveis fósseis nas FA, contribuindo para a descarbonização (Rühle, 2020). Como parte do “*Green Defence*”, a OTAN procura aumentar a eficácia operacional, melhorar a proteção ambiental em termos de alterações climáticas globais e aumentar a eficiência energética das FA aliadas (Larsen, 2015).

O processo de transição energética é caracterizado pela inovação, evidenciado no setor de transportes, como a eletrificação de veículos automotores. Assim, parece essencial ampliar a transferência de conhecimentos especializados do setor civil para o militar. É reconhecido que a investigação sobre a produção, armazenamento e utilização de hidrogênio dará um importante contributo para a criação de uma economia hipocarbônica.

3.2 Tecnologias de descarbonização: o uso do hidrogênio verde

O hidrogênio verde (H2V) tem sido considerado uma opção tecnológica viável para reduzir as emissões de carbono em setores que apresentam alta intensidade de poluição, tais como transporte, indústria petroquímica, siderurgia e mineração. A possibilidade de aplicação do hidrogênio verde pode suplantar o emprego de

combustíveis fósseis em automóveis, caminhões, trens e navios, atuar como energético nas indústrias de cimentos, aço, papel e celulose e, servir de matéria-prima na produção de fertilizantes e no refino de petróleo (EPBR, 2023).

Muitos países têm atribuído ao hidrogênio renovável um papel estratégico nos seus planos nacionais energéticos e climáticos. A fim de demonstrar as perspectivas das FA quanto ao uso do hidrogênio, achou-se pertinente na construção deste artigo, trazer à baila os resultados do estudo de Sobon et al. (2021), com dados dos países da Alemanha, Japão e Estados Unidos.

Na Alemanha a estratégia enfatiza o desenvolvimento do *Power-to-X* (PtX), tecnologia que converte energia renovável gerada por centrais fotovoltaicas ou eólicas em outras fontes de energia. O PtX pode ser usado para oferecer energia tanto para residências, transportes, quanto para as indústrias. Existem vários tipos de PtX e aplicabilidades, conforme o Quadro 1.

Tabela 1 - Tipos de PtX

Power-to-X	Características
Power-to-heat (PtH)	O PtH é um processo que utiliza a energia elétrica advinda de gerações de energias renováveis, podendo ser de geração eólica ou geração fotovoltaica. Assim, o PtH converte a energia em aquecimento, que pode vir de sistemas de resistências ou gerar vapor entre outras formas de aquecimento. É muito utilizado no hemisfério norte para aquecimento de residências e nas indústrias em que se aplica o vapor.
Power-to-gas (PtG)	O PtG é uma fonte de energia gerada a partir da geração de energias renováveis, usada para gerar combustíveis para veículos e indústrias, através do hidrogênio verde e de biocombustíveis.
Power-to-mobility (PtM)	O PtM utiliza a energia oriunda de fontes renováveis, eólica ou solar para o carregamento de baterias para veículos elétricos.
Power-to-chemicals (PtC)	O PtC é utilizada nos processos de conversão dessa energia elétrica em produtos químicos, principalmente a amônia NH ₃ e sal de amônia.
Power-to-fuel (PtF)	O PtF usa o processo de conversão das energias renováveis em combustíveis para veículos a combustão, por exemplo, aviação, caminhões e navios. Esses podem ser com uma combinação de CO ₂ e H ₂ O ou H ₂ e CH ₄ , além de também produzir querosene sintético, metanol e ácido fórmico.

Fonte: Adaptado de Reis (2023).

Com a mudança das matrizes energéticas dos países, o uso dos PtX estarão cada vez mais em evidência, pois além de ser sustentável, a energia gerada pelos sistemas PtX tende a ser cada vez mais acessível e barata. Para a Alemanha, o uso do hidrogênio como combustível para transportes e células de combustível no setor residencial, uma vez adaptado, tem potencial para ser plenamente utilizado no setor militar (Sobon et al., 2021).

No Japão, a estratégia para o uso de hidrogênio também foi desenvolvida num esforço para cumprir as metas acordadas no Acordo de Paris, durante a Conferência do Clima. A tecnologia do hidrogênio nas FA inclui o desenvolvimento de uma cadeia de abastecimento internacional, contribuindo assim para a melhoria das relações entre aliados, a fim de garantir a segurança do abastecimento nas zonas de conflito.

Tanto o Japão quanto a Alemanha reconhecem que a importação de hidrogênio de países com custos de produção relativamente baixos, pode ser mais viável economicamente do que produzi-lo internamente (Sobon et al., 2021).

Os Estados Unidos tendem a evitar a produção de hidrogênio renovável por razões econômicas. Antes de 2021, o governo americano era o principal opositor à redução das emissões de CO₂, como evidenciado pelo Protocolo de Quioto e a saída do país do Acordo de Paris. Contudo, após as eleições presidenciais de 2020, houve uma mudança nesse posicionamento, tendo sido dada maior prioridade à proteção do clima e ao que foi estabelecido no Acordo de Paris.

Para Sobon et al. (2021), com o estado atual da tecnologia, a utilização de Veículos Elétricos (VE) nas FA somente pode ocorrer fora das áreas de operações de combate. Contudo, em tempo de paz, as Viaturas Administrativas ou Não-Operacionais podem ser parcialmente ou totalmente movidas por motores elétricos, como é o caso das FA brasileiras.

A infraestrutura necessária para o carregamento dos VE está intimamente relacionada com o seu potencial de utilização nas FA. Para Coffman et al. (2017), isto gera uma desconexão entre o uso das VE no meio civil e

militar. Essa disparidade resulta da diversidade quanto à finalidade e função dos veículos e do grau de prontidão operacional exigido (Cerniauskas et al., 2019).

Os veículos com células de combustível de hidrogênio são uma opção para enfrentar os desafios do campo de batalha moderno, porém apesar da existência de alguns protótipos, existem desafios de ordem tecnológica, infraestruturais e econômicos que devem ser superados antes que os veículos se tornem, verdadeiramente, veículos de combate (Wenger et al., 2009).

Noussan et al. (2020) expõe que em Paris, 100 táxis estavam em operação com o uso de hidrogênio, e espera-se que até o final de 2030 esse número atinja 50.000 unidades. O Chevrolet ZH2, uma versão brasileira do modelo S10 Colorado, é outro exemplo da implementação de um veículo a hidrogênio. O veículo tem uma versão conceito produzida para ser utilizada pelo exército americano. O ZH2 trata-se de um modelo militar com capacidade de combinar baixo consumo de combustível com alta capacidade off-road (Dias, 2016).

No EUA, pesquisadores do *Ground Vehicle Systems Center* (GVSC) e do *US Army Research Laboratory* estão investigando o potencial da tecnologia de células de combustível na alimentação dos veículos de combate do futuro. A Viatura Blindada de Combate (VBC) Leopard, utilizada pelo Exército Brasileiro, movida a diesel, tem alta assinatura térmica, emite forte ruído e um volume considerável de gases do escapamento.

Para Bairstow (2019), a combinação de uma célula de combustível de hidrogênio e uma bateria de lítio é considerada ideal para o uso em blindados militares. A propulsão à hidrogênio pode gerar eletricidade sem fumaça, ruído, cheiro ou calor. De acordo com os cientistas do *Ground Vehicle Systems Center* (GVSC) e do *US Army Research Laboratory*, o uso do hidrogênio pode ampliar as capacidades furtivas, de forma a não ser detectável a uma distância de 1.000 metros, e a uma velocidade de 16 quilômetros por hora.

A *Boeing Research & Technology Europe* testou em voo um Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) elétrico alimentado por uma fonte de energia híbrida, movido por um gerador de hidrogênio que produz 900Wh de energia a partir de 1 litro de solução química. O VANT foi capaz de atingir tempos de voo próximos de 4 horas (Lapeña-Rey et al., 2017).

Também existem outros projetos de VANT movidos por células de combustível de hidrogênio como o Skywalker X8 e Thunderbird LN60F, protótipos da *Liaoning General Aviation Academy* (Khzouz et al., 2020).

A OTAN tem buscado adotar a estratégia de combustível único, a fim de facilitar o abastecimento em todos os sistemas, incluindo gasodutos subterrâneos. Promover mudanças para ecologizar a defesa, com o uso do hidrogênio, significa lidar com desafios logísticos sem precedentes. Há também a questão da baixa densidade energética do H2V em termos de volume, o que exigiria armazenamento e transporte mais complexos.

Biogradlja (2023) assinala que a transição para células a combustível de hidrogênio apresenta uma solução robusta, taticamente vantajosa e ecologicamente correta para o emprego em blindados militares. À medida que o mundo enfrenta os desafios colocados pelas alterações climáticas, setores como a Indústria de Defesa devem explorar soluções sustentáveis.

Apesar de o hidrogênio apresentar potencial promissor, a eletrificação atualmente se revela como uma alternativa mais econômica e benéfica para setores com altas emissões de carbono. A eletrificação emerge como a estratégia mais vantajosa para o transporte, aquecimento de residências e edifícios, bem como para a indústria. Por outro lado, o hidrogênio tem se mostrado como a melhor opção substitutiva nos setores de aviação, transporte marítimo, indústria química e armazenamento de eletricidade. Ou seja, as duas formas de energia se complementam, ainda que usadas em setores diferentes. A eletricidade possui vantagens como maior disponibilidade, rápida implementação, menor custo e eficiência comprovada. Em contrapartida, o hidrogênio demanda um processo de conversão que inclui a construção de infraestrutura e apresenta perdas significativas de energia durante o processo.

Hienuki et al. (2019) apontam que a principal desvantagem do hidrogênio é o armazenamento, que se comparado aos combustíveis fósseis, não é tóxico nem corrosivo. O H2V é muito volátil e se dissipa muito rapidamente no ambiente. Sua baixa radiação térmica resulta em baixa inflamabilidade, o que encurta a duração do incêndio e, além disso, é consumido muito rapidamente. E, o mais importante, o hidrogênio não causa contaminação ambiental (Cipriani et al., 2014).

Dados da Agência EPBR (2023) listam a existência de dezenas de projetos para produção de hidrogênio verde no Brasil. Estima-se que juntos eles somem mais US\$ 30 bilhões em investimentos, de acordo com levantamento do Instituto Nacional de Energia Limpa (INEL). Entretanto, a maioria deles ainda se encontram na

fase de estudo de viabilidade (Agência EPBR, 2023). Na Tabela 2 são descritas as dez principais iniciativas empreendedoras para a produção de H2V no Brasil.

Tabela 2 - Empreendimentos de Produção de Hidrogênio Verde no Brasil

Empreendimento	UF	Investimento	Produção	Ínicio
AES	CE	US\$ 2 bi	800 mil ton./ano	(1)
CASA DOS VENTOS E COMERC	CE	US\$ 4 bi	365 mil ton./ano	2026
EDP	CE	R\$ 42 mi	250 Nm3/h	2022
ELETROBRAS FURNAS	GO/MG	R\$ 45 mi	1,5 ton./ano	2021
FORTESCUE	CE	US\$ 6 bi	15 mi ton./ano	2025
QAIR	PE	US\$ 3,9 mi	488 mil ton./ano	2025
QAIR	CE	US\$ 6,9 bi	488 mil ton./ano	(1)
SHELL/RAÍZEN/HYTRON/TOYOTA	SP	R\$ 50 mi	390 ton./ano	2023
UNIGEL	BA	US\$ 1,5 bi	100 mil ton./ano	2023
WHITE MARTINS	PE	(1)	156 ton./ano	2022

Fonte: Adaptado de Agência EPBR (2023).

Legenda: (1) Dado não divulgado

Verifica-se que a maioria dos projetos são recentes, estão na região nordeste do Brasil, e, em portos-indústria, em razão da infraestrutura para exportação do hidrogênio, além de estarem próximos a grandes projetos de eólicas *offshore* com grande capacidade de produção de energia renovável.

No campo político nacional, no dia 14 de dezembro de 2023, o Projeto de Lei 5.816/2023 (Brasil, 2023), que cria o Programa de Desenvolvimento do Hidrogênio de Baixo Carbono (PHBC), foi aprovado pela Comissão Especial para Debate de Políticas Públicas sobre Hidrogênio Verde. O PL 5.816, no seu art. 2º, elenca seis princípios de incentivo ao hidrogênio de baixo carbono, quais sejam: i – fortalecimento das bases científico-tecnológicas; ii – capacitação de recursos humanos; iii – planejamento energético; iv – arcabouço legal e regulatório-normativo; v – abertura e crescimento do mercado e competitividade; e, vi – cooperação internacional (Brasil, 2023, p. 1).

Cabe salientar o que o PL 5.816/23 I estabelece as seguintes definições relacionadas ao hidrogênio:

I – **hidrogênio de baixo carbono**: hidrogênio combustível ou insumo industrial coletado ou obtido a partir de fontes diversas de processo de produção e que possua emissão de gases causadores do efeito estufa (GEE) menor ou igual a 4 (quatro) quilogramas de dióxido de carbono equivalente por quilograma de hidrogênio produzido (kgCO₂eq/kgH₂);

II – **hidrogênio verde**: hidrogênio combustível ou insumo industrial coletado ou obtido a partir de fontes renováveis, incluindo solar, eólica, hidráulica, biomassa, biogás, biometano, gases de aterro, geotérmica e outras a serem definidas pelo poder público (Brasil, 2023, p. 2-3, **grifo do autor**).

O PL 5816/23 autoriza o governo a criar um sistema para certificar as empresas produtoras de hidrogênio, considerando critérios internacionais. As empresas emissoras de carbono poderão gerar ativos comercializáveis no mercado de carbono. Quanto à regulação, a autorização para a produção do hidrogênio de baixo carbono caberá à Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), e a autorização para produção de hidrogênio proveniente da eletrólise da água caberá à Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel).

No estudo de Fiott (2014), o autor revela que a UE havia manifestado o interesse em regulamentar o mercado rumo à ecologização da Defesa, haja visto que a integração de critérios ecológicos nos processos de aquisição de equipamentos militares, o estímulo à pesquisa e desenvolvimento de tecnologias verdes, bem como a implementação de estratégias de gestão ambiental nas atividades militares, são passos cruciais para a construção de uma Defesa alinhada com os princípios da sustentabilidade.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A descarbonização das Forças Armadas e das Indústrias de Defesa brasileiras emerge como um tema de relevância estratégica e ambiental, alinhado aos esforços globais de mitigação das mudanças climáticas.

Conforme visto, é imperativo considerar as iniciativas adotadas por outras potências militares, como OTAN e os Estados Unidos, que têm avançado rumo à defesa verde, refletindo não apenas uma necessidade ambiental, mas também uma estratégia de segurança nacional.

Iniciativas como o investimento em veículos militares mais eficientes e a pesquisa e desenvolvimento de tecnologias de energia limpa têm sido promovidas com o intuito de reduzir a dependência das FA em combustíveis fósseis e minimizar sua pegada de carbono.

No contexto brasileiro, a descarbonização das Forças Armadas pode representar uma oportunidade única para o país não apenas reduzir sua contribuição para as mudanças climáticas, mas também promover a inovação e o desenvolvimento tecnológico. A adoção de fontes de energia renovável, a melhoria da eficiência energética nas instalações militares e a modernização da frota de veículos são algumas das medidas que podem ser exploradas para alcançar esse objetivo.

Além dos benefícios ambientais, a descarbonização das Forças Armadas brasileiras pode contribuir para fortalecer a imagem do país no cenário internacional, demonstrando um compromisso sólido com a sustentabilidade. Nesse sentido, é fundamental que haja um engajamento do Ministério da Defesa, Exército, Marinha e Aeronáutica em um diálogo construtivo, a fim de se adotar políticas e que sejam estabelecidas metas claras e mensuráveis para a redução das emissões de carbono.

Outra medida rumo à transição energética para a *Green Defense*, é promover a pesquisa e o desenvolvimento de tecnologias limpas e sustentáveis para uso nas atividades militares. Isso inclui o incentivo à produção e utilização de biocombustíveis para veículos e aeronaves militares, bem como o investimento em sistemas de propulsão mais eficientes e menos poluentes. Parcerias com empresas especializadas também é uma opção a ser explorada, pois como vimos, há várias iniciativas e investimentos no Brasil para acelerar o desenvolvimento e a adoção de tecnologias inovadoras para a hipocarbonização.

REFERÊNCIAS

- Agência EPBR. (2023). *Hidrogênio verde: conheça 10 projetos promissores em desenvolvimento no Brasil*, 26 Abr. [https://epbr.com.br/hidrogenio-verde-conheca-10-projetos-promissores-em-desenvolvimento-no-brasil/#:~:text=Unigel%20\(Bahia\),em%20larga%20escala%20do%20Brasil](https://epbr.com.br/hidrogenio-verde-conheca-10-projetos-promissores-em-desenvolvimento-no-brasil/#:~:text=Unigel%20(Bahia),em%20larga%20escala%20do%20Brasil)
- Bairstow, J. (2019). *US Army Develops Stealthy, Hydrogen Fuel Cell Powered Tanks*. Energy Live News, 29 Aug. <https://www.energylivenews.com/2019/08/29/us-army-takes-aim-at-stealthy-hydrogen-tanks/>
- Barry, B., Fetzek, S. & Emmett, C. (2022). *Green defence: the defence and military implications of climate change for Europe*. International Institute for Strategic Studies, February. <https://www.iiss.org/blogs/research-paper/2022/02/green-defence>
- Biogradlja, Arnes. (2023). H2 Energy News. *Germany: The Transition to Hydrogen Power for Military Tanks*, 10 July. <https://energynews.biz/germany-the-transition-to-hydrogen-power-for-military-tanks/>
- Brasil. (2023). Projeto de Lei 5916/23. *Programa de Desenvolvimento do Hidrogênio de Baixo Carbono*. Senado Federal, Brasília, DF.
- Brasil. (2020). *Política Nacional de Defesa e Estratégia Nacional de Defesa*. Ministério da Defesa. https://www.gov.br/defesa/pt-br/arquivos/estado_e_defesa/pnd_end_congresso_.pdf
- Brzoska, Michael. (2012). Climate change and the military in China, Russia, the United Kingdom, and the United States. *Bulletin of the Atomic Scientists*, 68:2, 43–54. <https://doi.org/10.1177/0096340212438384>
- Cerniauskas, S., Grube, T., Praktiknjo, A., Stolten, D. & Robinius, M. (2019). Future Hydrogen Markets for Transportation and Industry: The Impact of CO₂ Taxes. *Energies*, 12, 4707. <https://doi.org/10.3390/en12244707>
- Cipriani, G., Di Dio, V., Genduso, F., La Cascia, D., Liga, R., Miceli, R. Ricco Galluzzo, G. (2014). Perspective on hydrogen energy carrier and its automotive applications. *Int. J. Hydrom. Energy*, 39:16, 8482–8494. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.03.174>
- Closson, S. (2013). The military and energy: moving the United States beyond oil. *Energy Policy*, 61, 306–16. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.05.102>
- Coffman, M., Bernstein, P. & Wee, S. (2017). Electric vehicles revisited: A review of factors that affect adoption. *Transp. Rev.*, 37, 79–93. <https://doi.org/10.1080/01441647.2016.1217282>

- Dalby, Simon. (2018). Firepower: geopolitics cultures in the Anthropocene. *Geopolitics* 23:3, 718–42. <https://doi.org/10.1080/14650045.2017.1344835>
- Darbyshire, Eoghan. (2021). *How does war contribute to climate change?* Conflict and Environment Observatory, 14 June, <https://ceobs.org/how-does-war-contribute-to-climate-change/>.
- Depledge, D. (2023). Low-carbon warfare: climate change, net zero and military operations. *International Affairs*, 99, 2, 667–685. <https://doi.org/10.1093/ia/iiad001>
- Dias, D. (2016). Quatro Rodas. *Chevrolet Colorado ZH2: uma S10 a hidrogênio pronta para a guerra*, 23 Nov. <https://quatrorodas.abril.com.br/noticias/chevrolet-colorado-zh2-uma-s10-a-hidrogenio-pronta-para-a-guerra>
- Finkbeiner, Ann & van Noorden, Richard. (2022). Will war in Ukraine mark a new era for European defence research. *Nature*, 17 Aug., <https://doi.org/10.1038/d41586-022-02185-x>
- Fiott, Daniel. (2014). Reducing the environmental bootprint? Competition and regulation in the greening of Europe's defense sector. *Organization and Environment*, 27, 3, 263–78. <https://doi.org/10.1177/1086026614528807>
- Hienuki, S., Hirayama, Y., Shibusaki, T., Sakamoto, J., Nakayama, J. & Miyake, A. (2019). How knowledge about or experience with hydrogen fueling stations improves their public acceptance. *Sustainability*, 11, 6339. <https://doi.org/10.3390/su11226339>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC. (2018). *Summary for policymakers*. Cambridge: Cambridge University Press, 2018.
- Jayaram, Dhanasree. (2021). ‘Climatizing’ military strategy? A case study of the Indian armed forces. *International Politics*, 58, 619–39. <https://doi.org/10.1057/s41311-020-00247-3>
- Klare, M. T. (2019). *All hell breaking loose: the Pentagon’s perspective on climate change*. New York: Metropolitan Books.
- Khzouz, M., Gkanas, E.I., Girella, A.; Statheros, T., & Milanese, C. (2020). Sustainable hydrogen production via LiH hydrolysis for unmanned air vehicle (UAV) applications. *Int. J. Hydrot. Energy*, 45:8, 5384–5394. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.05.189>
- Lapeña-Rey, N., Blanco, J.A., Ferreyra, E., Lemus, J.L., Pereira, S. & Serrot, E. (2017). A fuel cell powered unmanned aerial vehicle for low altitude surveillance missions. *Int. J. Hydrot. Energy*, 42:10, 6926–6940. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.01.137>
- Larsen, K. K. (2015). *Unfolding Green Defense: linking green technologies and strategies to current security challenges in nato and the nato member states*. Centre for Military Studies: Copenhagen, Denmark, Dec. https://cms.polsci.ku.dk/publikationer/unfolding-green-defense/Undfolding_Green_Defense_CMS-rapport.pdf
- McKinsey & Company. (2022). *The net-zero transition: What it would cost, What it could bring*, Jan. <https://www.mckinsey.com/capabilities/sustainability/our-insights/the-net-zero-transition-what-it-would-cost-what-it-could-bring>
- Michaelowa, Alex & Koch, Tobias. (2001). Military emissions, armed conflicts, border changes and the Kyoto Protocol. *Climatic Change*, 50:4, 384-394. <https://doi.org/10.1023/A:1010695312025>
- NATO. (2021). Remarks by NATO Secretary General Jens Stoltenberg at the high-level roundtable. *Climate, Peace and stability: weathering risk through COP and beyond in Glasgow, UK*, 2 Nov., https://www.nato.int/cps/en/natohq/opinions_188262.htm
- Noussan, M., Raimondi, P.P., Scita, R. & Hafner, M. (2020). The Role of Green and Blue Hydrogen in the Energy Transition - A Technological and Geopolitical Perspective. *Sustainability*, 13:1, 298. <https://doi.org/10.3390/su13010298>
- Nugee, Richard. (2021). Climate change: maintaining freedom of manoeuvre. *Wavell Room*, 15 Sept. <https://wavellroom.com/2021/09/15/climate-change-maintaining-freedom-of-manoeuvre/>
- Owen-Burge, C. (2021). MOD climate chief: inaction will lead to a “more expensive, weaker military”. *Race to Zero*, 25 May. <https://climatechampions.unfccc.int/mod-climate-chief-inaction-will-lead-to-a-more-expensive-weaker-military/>
- Pfeifer, S. (2021). Rise of ESG adds to pressure on European defence companies. *Financial Times*, 1 Dec. <https://www.ft.com/content/e14ea515-a6f3-4763-9def-7bc40d3b2e4a>
- Reis, D. (2023). Serviços em Destaque. *O que são Power-to-X e exemplos mais comuns*, 10 Jan. <https://www.servicoemdestaque.com.br/power-to-x/>

- Rühle, M. (2020). *Scoping NATO's Environment Security Agenda*. NDC Policy Brief.
<https://www.jstor.org/stable/resrep23666>
- Ruszel, M. (2018). NATO and the European Union towards Problems of International Security in the 21st Century. In: *A Transatlantic or European Perspective of World Affairs*. Podraza, A. (Ed.). Biblioteca Benjamin Franklin, 1, 169–182.
- Samaras, C., Nuttall, W. J. & Bazilian, M. (2019). ‘Energy and the military: Convergence of security, economic, and environmental decision-making’, *Energy Strategy Reviews*, 26.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211467X19301026>
- Sobon, A., Sly's, D., Ruszel, M. & Wiacek, A. (2021). Prospects for the Use of Hydrogen in the Armed Forces. *Energies*, 14, 7089. <https://doi.org/10.3390/en14217089>
- Weng, C. K. & Boehmer, K. (2006). Launching of ISO 14064 for greenhouse gas accounting and verification. *ISO Manag. Syst.*, 15, 14–16. <https://www.iso.org/files/live/sites/isoorg/files/archive/pdf/en/greenhouse.pdf>
- Wenger, D., Polifke, W., Schmidt-Ihn, E., Abdel-Baset, T. & Maus, S. (2009). Comments on solid state hydrogen storage systems design for fuel cell vehicles. *Int. J. Hydrot. Energy*, 34:15, 6265–6270.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.05.072>
- Westing, Arthur. (2008). The impact of war on the environment. In: Levy, B. S. & Sidel, V. W. (Eds.). *War and public health*, 2nd. Oxford: Oxford University Press, 69–84.