



Descarbonização e Sustentabilidade no Setor de Defesa: eficiência energética e novas capacidades de defesa

Fernanda das Graças Corrêa

FICHA INSTITUCIONAL

Conselho de Administração

Marcelo Furtado
Raul Jungmann
Sergio Westphalen Etchegoyen

Diretora Executiva

Mariana Nascimento Plum

Coordenador Administrativo-Financeiro

Newton Raulino

Coordenadora de Pesquisa

Bruna Ferreira

Coordenadora de Projetos

Mila Campbell

Coordenadora de Comunicação

Valéria Amorim

Assistente Administrativa-Financeira

Leandra Barra

Revisão

Mariana Nascimento Plum
Bruna Ferreira
Mila Campbell
Tamiris Santos

Projeto Gráfico e Diagramação

Pedro Bopp

APOIO:



2025

Descarbonização e Sustentabilidade no Setor de Defesa:
eficiência energética e novas capacidades de defesa

Palavras-chave:

1. Eficiência energética.
2. Capacidades de defesa.
3. Guerra do futuro.
4. Surpresas estratégicas.

As opiniões aqui expressas são de inteira responsabilidade do(a)
(s) autor(a)(es)(as), não refletindo, necessariamente, a posição das
instituições envolvidas.

Descarbonização e Sustentabilidade no Setor de Defesa: eficiência energética e novas capacidades de defesa

— Fernanda das Graças Corrêa¹

Sumário Executivo

Este importante Estudo trata de um tema inédito e muito pouco explorado na literatura de Estudos de Defesa. A emergência das mudanças climáticas impõe que os decisores da política global reformulem suas estratégias para mitigar os danos que ocorrerão na economia, na sociedade e nas relações entre os Estados, impactando, dessa forma, também a defesa.

A **primeira seção** deste Estudo trata do Poder dos Estados e a Geopolítica Ambiental Global, na qual se ilustra de que forma cenários catastróficos de escassez de água potável, aumento das inundações e do nível do mar, insegurança alimentar, períodos longos de estiagem, morte de diversas espécies de animais, deslizamentos de terra, aumento das enchentes, ocorrência de incêndios florestais e perda de biodiversidade poderão ser intensificados com o advento das mudanças climáticas, sobretudo, em Estados subdesenvolvidos. Elucida-se também nesta seção como Estados desenvolvidos e em desenvolvimento têm se articulado e estabelecido compromissos internacionais para mitigar os impactos destes possíveis cenários no mundo e em seus próprios territórios. Diante destas catástrofes, tanto o poder dos Estados quanto a Geopolítica são colocados em xeque à medida que a agenda ambiental exigirá que os Estados reformulem suas estratégias para enfrentar novas ameaças à segurança internacional, como a insegurança alimentar e a insegurança energética.

A **segunda seção** trata das surpresas estratégicas e capacidades de defesa na guerra do futuro e elucida como os Estados estão reformulando suas estratégias para enfrentar as novas ameaças intensificadas pelas mudanças climáticas. Os teatros de operações militares serão profundamente afetados à medida que o emprego de novas tecnologias verdes contribuirá para o surgimento de novas capacidades de Defesa e impactará no próprio curso da guerra do futuro. A maioria dos Estados que está preparando e capacitando suas Forças Armadas para lidar com as mudanças climáticas tem como foco a vantagem operacional e a otimização dos meios de transporte militares. Neste Estudo, a eficiência energética dos meios de transporte militares e o surgimento de novas capacidades de Defesa são analisadas sob o olhar das surpresas estratégicas. Neste sentido, este Estudo colabora para que o Ministério da Defesa e as Forças Armadas brasileiras sejam capazes de prever e se antecipar a uma ameaça externa aguda e imediata aos interesses nacionais. Em outras palavras, em possíveis cenários de

1. Pós-doutoranda em Defesa Química, Biológica, Radiológica e Nuclear (DQBRN) pelo Instituto Militar de Engenharia (IME). Pós-doutora em Modelagem de Sistemas Complexos pela USP e em Ciências Militares pela ECEME, doutora em Ciência Política na área de concentração em Estudos Estratégicos pela UFF e é pesquisadora da linha "Prospecção de tecnologias emergentes e disruptivas: abordagens teóricas, metodológicas e práticas" do Grupo de Estudos em Tecnologias de Defesa e a Evolução do Pensamento Estratégico (GETED/UNESP).

guerra, as Forças Armadas brasileiras poderão ser surpreendidas por inimigos que ameacem a soberania nacional com tecnologias verdes com poder dissuasório mais eficaz e eficiente que as que empregam combustíveis de origem fóssil, modificando tanto as linhas de produção quanto o *modus operandi* das guerras do futuro, minando a prontidão militar e impondo custos cada vez mais insustentáveis à Defesa.

Nesta segunda seção, debatemos também a atuação do Brasil na agenda global de sustentabilidade, ou seja, como o Brasil tem se articulado para cumprir com o seu compromisso internacional de reduzir as suas emissões de gases de efeito estufa em 48% até 2025 e 53% até 2030, e o que essas metas representam para a Defesa e a Soberania Nacional. Embora a matriz elétrica brasileira seja considerada uma das mais limpas do mundo, várias são as tecnologias de combustíveis sustentáveis fomentadas pelo governo como alternativas aos combustíveis fósseis. O objetivo do governo é integrar políticas públicas historicamente bem sucedidas, como o Pro-álcool, o Biodiesel e o Renovabio, com novas políticas públicas, como Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (Proconve), Rota 2030, Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular, o Programa Nacional da Racionalização do Uso dos Derivados de Petróleo e do Gás Natural (CONPET), o Programa Nacional de Combustível Sustentável de Aviação (ProBioQAV) e o Programa Nacional de Diesel Verde (PNDV).

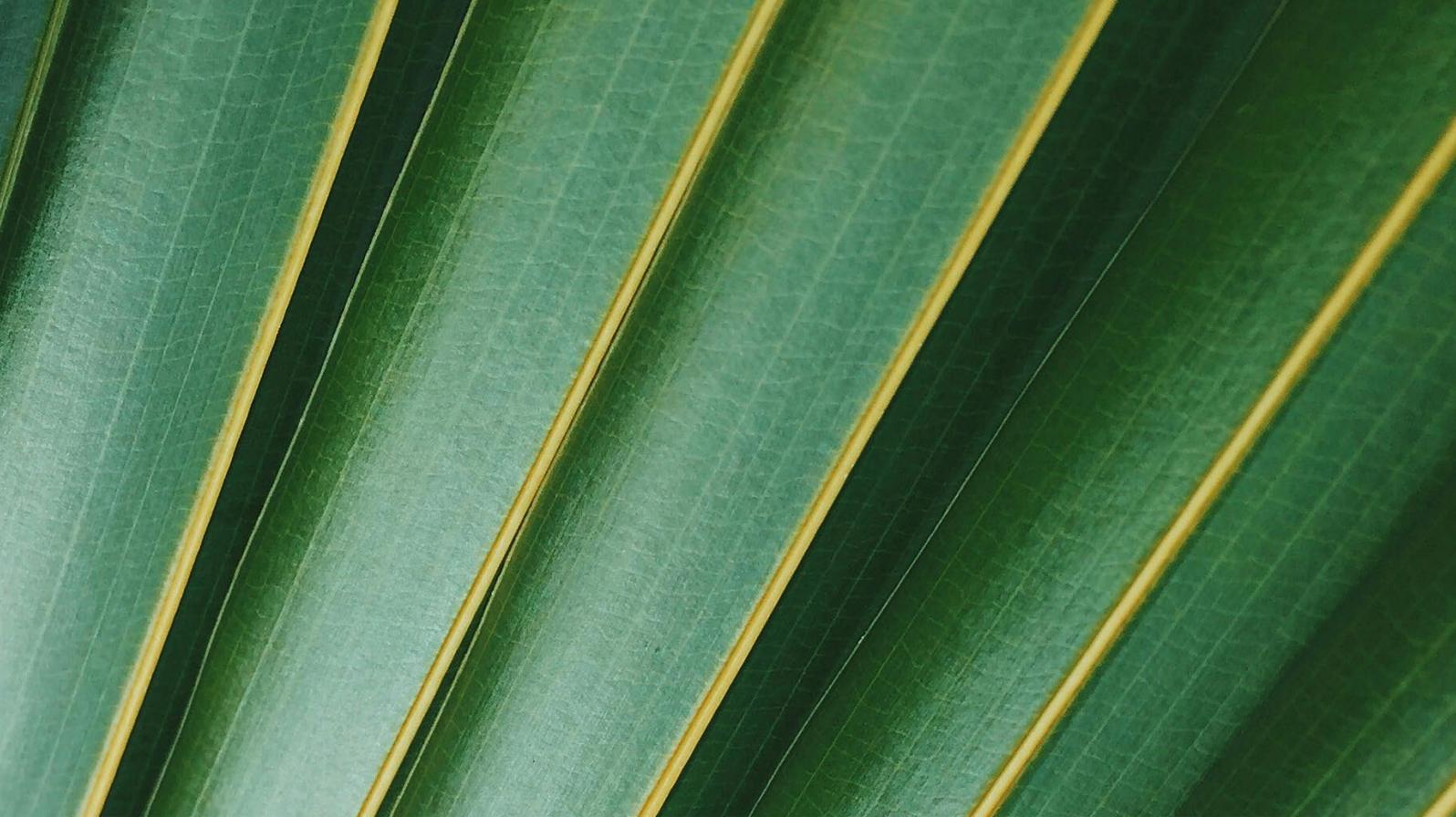
A **terceira seção** trata especificamente da metodologia empregada neste Estudo e dos critérios selecionados para enquadrar as fontes energéticas de baixo carbono que reúnem as condições necessárias para substituir combustíveis fósseis em teatros de operações militares na guerra do futuro. Em função de muitas destas novas tecnologias ainda estarem em fase de teste ou no início da inserção mercadológica, a possibilidade de aumento de eficiência energética de meios militares citada neste Estudo é presumida.

É na **quarta seção** que os combustíveis sustentáveis inovadores são identificados e analisados, conforme enquadramento de critérios bem específicos, elaborados com base em dados e informações extraídos da literatura científica levantada neste Estudo. As tecnologias e suas principais tendências foram analisadas comparativamente uma por uma, de forma detalhada, apontando todos os *stakeholders* que participam, interagem e/ou acompanham os seus ciclos de vida. Foram acessadas diversas bases de dados, como as da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), as do Instituto de Pesquisa Econômica-Aplicada (IPEA), as da Comissão Europeia, as da Petróleo Brasileiro S. A. (PETROBRAS), as da Eletronuclear, as da Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA), as da Administração Nacional de Aeronáutica e Espaço (NASA, na sigla em inglês), entre outras, para permitir que o leitor deste Estudo conheça os principais insumos estratégicos dos combustíveis sustentáveis inovadores, as principais dificuldades enfrentadas na cadeia produtiva e as grandes oportunidades que estes combustíveis podem gerar neste novo mercado que se abre para as indústrias e para as Forças Armadas brasileiras.

Na **quinta seção** deste Estudo é apresentado o refinamento das tecnologias dos combustíveis sustentáveis inovadores que têm potencial emprego na Defesa e quais são os gargalos e os benefícios que estas tecnologias podem gerar nas Forças Armadas. Importante sinalização é realizada para que o Brasil não entre na guerra de narrativas e na política da agenda ambiental global sem ter seu próprio argumento científico em favor das tecnologias verdes. Os combustíveis sustentáveis para a Defesa aqui destacados reúnem as condições para, no futuro, aumentar as capacidades de Defesa das Forças Armadas. Entretanto, estas Forças só serão capazes de evitar surpresas estratégicas ou gerar efeitos de surpresas estratégicas numa eventual guerra no futuro se o Brasil for capaz de protagonizar na agenda ambiental global com argumento científico e discurso político próprio.

Na **sexta seção**, são apresentados os principais desafios que a Defesa e as Forças Armadas tendem a enfrentar no jogo político da agenda ambiental global e algumas sugestões e recomendações para que a Defesa e as Forças Armadas brasileiras possam, de fato, explorar o máximo de oportunidades possíveis desta atual conjuntura internacional. Exclusivamente, foram elaborados para este Estudo quadros, por região geográfica, que reúnem dados e informações de plataformas públicas do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) que podem aumentar a vantagem competitiva do Brasil em possíveis cenários de guerra do futuro, mobilizando agências de fomento à pesquisa, entidades bancárias, indústrias, universidades, centros avançados de pesquisa, laboratórios científicos com equipamentos de alta complexidade e recursos humanos altamente qualificados em todo território nacional.





1.

Poder dos Estados e a Geopolítica Ambiental Global

As mudanças climáticas estão relacionadas às transformações significativas nos padrões de temperatura e clima da Terra ao longo do tempo, impulsionadas, de forma desenfreada, pela queima de combustíveis fósseis, como carvão, petróleo e gás, e por emissões de gases de efeito estufa, como anidrido carbônico, metano e óxido de azoto. Independentemente de suas causas, no âmbito do conceito de novas ameaças, as consequências das mudanças climáticas já se apresentam e têm gerado impactos significativos na economia, na indústria e na sociedade. Algumas das consequências são a escassez de água potável, aumento das inundações e do nível do mar, insegurança alimentar, períodos longos de estiagem, morte de diversas espécies de animais, deslizamentos de terra, aumento das enchentes, a ocorrência de incêndios florestais e perda de biodiversidade, dentre outros. “Em 2019, último ano antes da pandemia de Covid-19, estima-se que a emissão de CO2 antropogênico para a atmosfera foi de 43 bilhões de toneladas, das quais cerca de 7,6 bilhões (~18%) originaram-se do setor de transporte” (Prauchner *et al.*, 2023, p.1).

As mudanças climáticas têm exigido dos Estados transformações drásticas na maneira como se relacionam com o planeta a fim de tentar mitigar os danos provocados e adaptar a humanidade às alterações climáticas, limitando o aumento da temperatura global para menos de dois graus Celsius. De fato, o meio ambiente sadio é de suma importância para a preservação do espaço geográfico vital e portanto reclama a adoção de mecanismos aptos a permitir o deslinde das mais variadas problemáticas que permeiam as relações internacionais, assim, aderindo-se à uma metodologia factual e proativa, sem dúvidas, concretizar-se-á a solução de questões outrora impassíveis de solução, pois sem o empenho internacional e aplicação de mandamentos transnacionais de coibição ao dano ambiental, que tanto violam o senso de liberdade e a existência humana, não será possível viabilizar a proteção ambiental (Daclon, 2008 *apud* Borile e Calgaro, 2019, p. 216).

Existem diversos Estados engajados no compromisso global de descarbonizar a economia e aumentar a sustentabilidade por meio de leis e tratados. O conceito de sustentabilidade está relacionado ao “desenvolvimento harmônico da economia e ecologia que devem ser ajustados numa correlação de valores onde o máximo econômico reflita igualmente um máximo ecológico” (Derani, 2009 *apud* Peixer, 2019, p. 169).

É possível citar alguns exemplos de convenções internacionais que trataram do tema e deliberaram ações sobre as mudanças climáticas: a Convenção sobre as Mudanças Climáticas no Rio de Janeiro (1992), a Convenção Sobre Diversidade Biológica (1992), a Declaração de Princípios sobre Florestas (1992), o Protocolo de Quioto (1997), o Marco de Sendai para Redução do Risco de Desastres (2015), a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável (2015), e o Acordo de Paris (2015). O Protocolo de Quioto, por exemplo, tornou possível a construção de um mercado global de carbono entre os países e a criação de instrumentos e políticas de mitigação auxiliares aos créditos de carbono, que buscam aumentar a cooperação entre os países e incentivar projetos que visem a baixa emissão de gases de efeito estufa, a preservação e o reflorestamento de matas, entre outros (Oliveira, 2022).

A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável é constituída por 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e 169 metas que estimulam ações dos Estados comprometidos pelos próximos 15 anos em áreas consideradas estratégicas para planeta, como o combate à mudança do clima e seus impactos. Nesta Agenda, os Estados desenvolvidos se comprometeram com a mobilização conjunta de US\$ 100 bilhões anualmente a partir de 2020 a fim de operacionalizar o Fundo Verde para o Clima.

O Fundo Verde para o Clima (GCF, na sigla em inglês) foi criado pela Convenção-Quadro da Organização das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (UNFCCC, na sigla em inglês) em 2010 e tem por missão apoiar processos transformacionais de resposta global às mudanças climáticas. Sediado na Coreia do Sul, os recursos alocados pelos países desenvolvidos no GCF são destinados para a criação, nos países em desenvolvimento, de projetos e programas de baixa emissão de carbono e resilientes ao clima, visando atender necessidades de sociedades altamente vulneráveis aos efeitos das mudanças climáticas.

Os debates internacionais no século XXI sobre mudanças climáticas trouxeram questões ainda mais difusas e mais complexas para os Estados, em especial, relacionadas às questões de responsabilidades no exercício da soberania. Muitos especialistas têm argumentado em fóruns internacionais e nacionais que os problemas relacionados à mudança do clima apresentam desafios muito mais geopolíticos do que tecnológicos. Diversos Estados já dispõem de tecnologia com capacidade de mitigar os danos e reduzir metade das emissões globais de gases de efeito estufa até 2030.

“Os debates internacionais no século XXI sobre mudanças climáticas trouxeram questões ainda mais difusas e mais complexas para os Estados, em especial, relacionadas às questões de responsabilidades no exercício da soberania.”

Tom Terlouw e Christian Bauer, pesquisadores do Instituto Paul Scherrer (IPS) e do Instituto Federal de Tecnologia de Zurique (ETHZ, na sigla em alemão), por exemplo, ambos na Suíça, investigam a captura direta de dióxido de carbono do ambiente para remover gases de efeito estufa da atmosfera com eficiência (Terlouw *et al.*, 2021). Este estudo foi publicado na revista *Environmental Science & Technology*, em 2021: “O resultado indicou que, dependendo da combinação tecnológica aplicada e do ambiente específico, o dióxido de carbono pode ser removido do ar com uma eficácia de até 97% com planejamento cuidadoso, por exemplo, em relação à localização e ao fornecimento da energia necessária, o CO₂ pode ser removido de maneira eficaz para o clima.” (Paul Scherrer Institute, 2021).

O desenvolvimento tecnológico é um componente importante para a Geopolítica desde os seus primeiros modelos. Ratzel dava papel capital para o domínio técnico no processo de sedentarização dos povos e na constituição dos territórios estatais; Mackinder apostava na vivificação do *heartland* euro asiático por meio da implantação das ferrovias russas para edificação de um Império universal; já Spykman usou como argumento para contrapor contra os isolacionistas estadunidenses as novas capacidades da aviação militar que, em seus voos transoceânicos, poderia reduzir a “fortaleza continental” norte americana a completa nulidade. Cabe também dizer que a Geopolítica está limitada em suas conclusões se não for acompanhada pelo conceito de poder nacional, onde se figuram como grandes formuladores os analistas Hans Morgenthau (1904-1980) e Ray Cline (1918-1996) (Martins e Pianovski, 2013, p. 28).

A palavra poder está diretamente relacionada à capacidade de indivíduos ou de grupos de atingir seus objetivos ou de influenciar o comportamento de outros grupos ou indivíduos. O poder de um Estado Nacional é fortaleci-

do pelo seu território, sua população, pela disponibilidade de seus recursos naturais, sua capacidade industrial, sua capacidade militar, pela eficiência e abrangência diplomática e a eficiência do governo (Morgenthau, 2003 *apud* Martins e Pianovski, 2013). Geopolítica está associada ao poder à medida que, analogamente, os Estados Nacionais têm por objetivo gerenciar um território e controlar uma população, por meio dos quais visam obter saldos positivos de poder, projetados nas suas relações com outros Estados no sistema internacional.

O desenvolvimento das mais variadas técnicas e modos de produção exploratória, impulsionadas e financiadas pelos sistemas de capital e mercado das indústrias fomentaram a escassez dos mais variados recursos ambientais e demandaram em grande afã a exploração de recursos minerais e de energia para sustentar em pleno andamento as atividades extrativista e industrial (Borile e Calgaro, 2019, p. 214).

A partir da Segunda Guerra Mundial (1939-1945), se por um lado os fluxos migratórios, de informações e de mercadorias tornaram o modelo de desenvolvimento socioeconômico cada vez mais global, por outro lado, a degradação da capacidade ecológica do planeta tem se tornado mais evidente. A questão ambiental está, portanto, intrinsecamente associada ao debate geopolítico global à medida que a escassez de recursos essenciais à sobrevivência humana compromete o espaço vital dos Estados (Borile e Calgaro, 2019), porém constitui uma “crise antropogênica (produto do ser humano em geral) e teria começado com a Revolução Industrial” (Estenssoro e Bustamente, 2022, p. 9). “Quando tais recursos começarem a faltar para as populações dos países desenvolvidos do Norte, os vácuos de poder localizados na América Latina, África e Ásia são (e serão) alvos da ocupação econômica ou mesmo de intervenções militares” (Martins e Pianovski, 2013 *apud* Borile e Calgaro, 2019, p. 213).

Embora as hipóteses que sustentam as mudanças climáticas ainda estejam se consolidando entre os estudiosos da temática, indiscutivelmente, o planeta está sofrendo processos graves de alterações climáticas, perda de biodiversidade, escassez de recursos naturais, poluição de todos os tipos e explosão de fluxos migratórios e demográficos, impactando profundamente os processos decisórios dos Estados enquanto atores centrais no sistema internacional.

Tanto no passado quanto no presente, os efeitos dos gases de efeito estufa são, geopoliticamente, distribuídos de formas desiguais na atmosfera. De acordo com Brunnée (2010), apesar de as emissões dos países industrializados ainda excederem de forma significativa as emissões dos países em desenvolvimento, existem projeções para aumento destas nas próximas décadas. Outro vetor de desigualdade, segundo o autor, se refere aos efeitos das mudanças climáticas serem também desiguais à medida que os países industrializados possuem capacidade econômica e tecnológica muito maior, não só para ações de mitigação, como também para se adaptarem às consequências das emissões de gases de efeito estufa na atmosfera. “A preocupação com o futuro comum do planeta e a almejada sustentabilidade não passam de uma retórica, se antes não enfrentarmos, com seriedade, a situação de penúria em que se encontram dois terços da humanidade” (Szwarcwald *et al.*, 1992 *apud* Campello, 2013, p. 135).

Desta forma, as mudanças climáticas trazem à luz questões de desigualdade envolvendo, por exemplo, a segurança alimentar e a segurança energética. Embora a oscilação de preços e o desperdício de alimentos ainda sejam considerados os grandes vilões da insegurança alimentar global, as mudanças climáticas têm se tornado mais um grande vilão.

Prejuízos das reservas de água potável, perdas pedológicas por erosão, salinização ou outras formas de inviabilização do solo, danos causados às reservas de pescado (tanto pela poluição, pela construção de barragens, como também pela própria pesca predatória) são particularmente preocupantes, porque põem em perigo, em longo prazo, a segurança alimentar das diferentes populações do planeta (Martins e Pianovski, 2013, p. 33).

Neste contexto, países menos desenvolvidos não terão recursos financeiros, tecnológicos ou materiais para reverter, em curto ou médio prazo, os efeitos catastróficos das mudanças climáticas sobre seus solos e serão as maiores vítimas da insegurança alimentar. Na região do Chifre da África, por exemplo, secas e inundações recorrentes, elevação das temperaturas e a competição cada vez maior por terra arável vêm exacerbando o subdesenvolvimento e a instabilidade política na região. O Instituto Igarapé, juntamente com os governos do Quênia e da Suíça, utilizou tecnologias de sensoriamento remoto e literatura científica para descrever a forma como a relação clima-segurança está moldando a região do Chifre da África.

As secas recorrentes e as inundações repentinas estão a minar a produção agrícola e pecuária, perturbando a pesca nos principais lagos e aprofundando as tensões entre as comunidades que já estão no limite. O aumento do deslocamento da população está a gerar ciclos de feedback negativos, enquanto os grupos armados em toda a região estão a lucrar com instabilidade para expandir sua influência (Instituto Igarapé, 2022, p. 2).

Outra faceta consiste na segurança energética. Diversas disputas e conflitos internacionais do século XXI tornam evidente como a segurança energética tem impactado nos esforços de Estados europeus, por exemplo, para não mais depender do gás natural russo. Alemanha e França possuem recursos para elaborar ações de mitigação e adaptação de curto a médio prazo às mudanças climáticas, mas o mesmo não se estende a outras regiões do globo, especialmente Estados menos desenvolvidos. Neste sentido, a geopolítica ambiental envolve também requisitos éticos contemporâneos, como direitos humanos e equidade na relação entre os seres humanos e destes com o meio ambiente, sob um princípio de solidariedade internacional a ser considerado em uma gestão mundial da mudança climática (Feltz, 2019).

Outro contexto que evidencia intervenções e pode se configurar em um vetor de desigualdade consiste no mercado de crédito de carbono e na Redução de Emissões por Desmatamento e Degradação florestal (REDD, na sigla em inglês), exemplos de mecanismos regulatórios oriundos de pressões políticas insustentáveis do ponto de vista político, socioeconômico e, principalmente, ambiental. De acordo com Campelo (2013, p. 137), “para os países que possuem grandes áreas de biodiversidade, isso representa uma verdadeira imobilização e ingerência externa aos parques naturais com enorme potencial estratégico a ser explorado, apenas para proveito de outros, que podem poluir ao comprar créditos de carbono”. Na mesma linha de pensamento, de acordo com Becker (2011), as REDD não transformam a origem do problema nem atingem as causas do desflorestamento per se, mas sim colocam limitações de crescimento aos mais pobres ao manter as florestas improdutivas, envolver florestas nativas e não apresentar de forma clara quem recebe o financiamento (Campelo, 2013). Um exemplo disso ocorre na Amazônia brasileira.

Sendo a Amazônia alvo de interesses de muitos países, corporações e pessoas externas à região, caberia ao Brasil, como maior detentor desse bioma, identificar os problemas regionais e propor soluções que viabilizassem o seu desenvolvimento. Entretanto, o desenvolvimento sustentável que se pretende para a Amazônia deve ser entendido como algo além de um representativo crescimento de setores da economia, como um desenvolvimento tecno-científico das estruturas produtivas aliado às melhorias sociais e à universalidade da saúde, que envolve também o acesso à cultura e a representação política em consonância e harmonia com o meio ambiente. Assim sendo, tal desenvolvimento deve ser condicionado para a melhoria nas condições de vida dos verdadeiros protetores da floresta, a população regional. Contudo, diversos conflitos de interesses dificultam a utilização de concepções e ações adequadas para esse desenvolvimento regional (Campelo, 2013, p. 138).

Não é novidade na História ações envolvendo pactos climáticos, ingerência militar e interesses nos recursos naturais e culturais na região, cuja internacionalização é tema recorrente em eventos e fóruns de discussão da comunidade internacional (Walt, 2019). Os questionamentos acerca da capacidade dos Estados que circundam a região amazônica em garantir a sua preservação nas décadas de 1960 e de 1970 culminaram na assinatura do Tratado de Cooperação Amazônica (TCA) de 1978, com o objetivo de promover o desenvolvimento harmônico dos territórios amazônicos, de maneira que as ações conjuntas gerassem resultados equitativos e benéficos para alcançar o desenvolvimento sustentável da região.

Em dezembro de 1995, os oito Países Membros do TCA decidiram criar a Organização do Tratado de Cooperação Amazônica (OTCA). O trabalho da OTCA está orientado pela Agenda Estratégica de Cooperação Amazônica (AECA), que identifica as prioridades dos países amazônicos a médio prazo, sob o TCA, de acordo com a realidade econômica, política, ambiental e social da região. Dentre os objetivos estratégicos da AECA, encontram-se:

- Facilitar o intercâmbio e a cooperação entre os Países Membros promovendo o desenvolvimento sustentável e modos de vida sustentáveis de caráter estratégico na região, visando melhorar a qualidade de vida de seus habitantes, com ênfase nas populações vulneráveis, povos indígenas e outras comunidades tribais.

“...a geopolítica ambiental envolve também requisitos éticos contemporâneos, como direitos humanos e equidade na relação entre os seres humanos e destes com o meio ambiente, sob um princípio de solidariedade internacional a ser considerado em uma gestão mundial da mudança climática.”

- Zelar pelo respeito e pela promoção dos interesses e da soberania dos Países Membros.
- Facilitar e fomentar ações voltadas para a preservação, a proteção, a conservação e o aproveitamento sustentável da floresta, da biodiversidade e dos recursos hídricos da Amazônia.
- Promover o aproveitamento dos recursos amazônicos baseado no espírito de respeito e de harmonia com a natureza e o meio ambiente.
- Promover e disseminar a cultura dos povos que habitam a Região Amazônica e fomentar o respeito e a proteção dos conhecimentos e saberes ancestrais e atuais da Região Amazônica.
- Promover a articulação dos Planos e Programas dos Países Membros para o desenvolvimento das populações amazônicas, dando especial atenção às populações vulneráveis, povos indígenas e outras comunidades tribais (OTCA, 2010, p. 16).

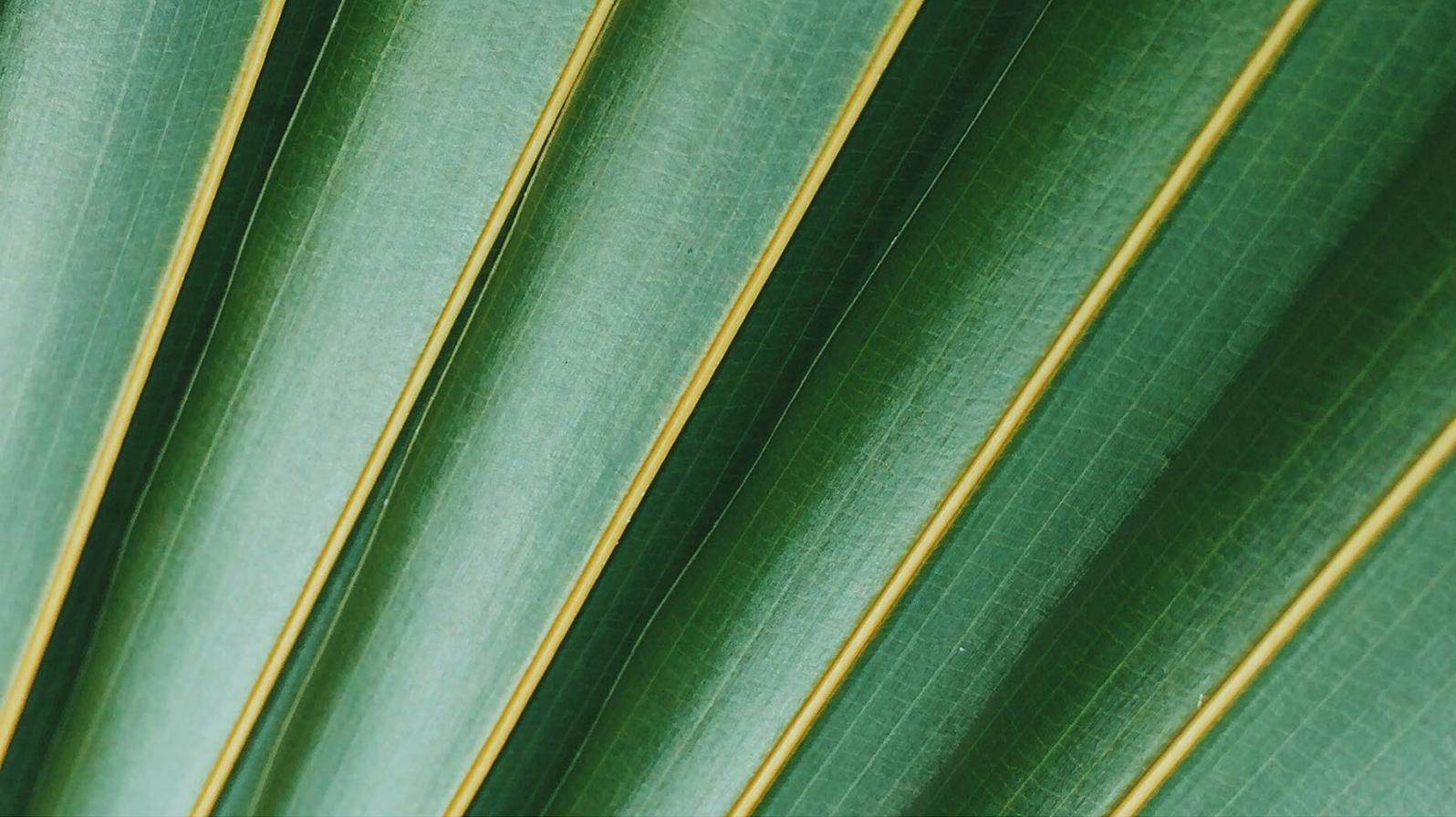
Dentre as modalidades de financiamento para a implementação da AECA, encontram-se as contribuições da cooperação internacional, recebidas no marco da resolução X-MRE-OTCA-7, de 30 de novembro de 2010, em que Governos, Organismos Internacionais, Organizações Não Governamentais (ONGs), Fundações e Empresas Públicas e Privadas podem alocar recursos financeiros para o funcionamento da OTCA e a implementação de seus projetos. Sendo o respeito à soberania dos Estados-membros um dos objetivos estratégicos da AECA, a atuação de outros países na região se limita, portanto, ao financiamento internacional.

Há também iniciativas nacionais nesse mesmo sentido. O Fundo Amazônia, por exemplo, criado pelo Brasil em 2008, “tem por finalidade captar doações para investimentos não reembolsáveis em ações de prevenção, monitoramento e combate ao desmatamento, e de promoção da conservação e do uso sustentável da Amazônia Legal”. Alguns dos países europeus que financiam o Fundo Amazônia são Noruega e Alemanha, os quais visualizam no Brasil um potencial mercado consumidor de “serviços em tecnologia verde”, ainda pouco explorados e desenvolvidos no país sul-americano (Castro *et al.*, 2013 *apud* Barros, 2020).

Um estudo do MapBiomas, utilizando dados georreferenciados por satélites, aponta um aumento de 363% na área de pastagem na Amazônia entre 1985 e 2023 (MapBiomas, 2024). A remoção de vegetação nativa preocupa devido ao possível “ponto de não retorno”, onde o bioma não conseguiria se recuperar, causando uma degradação irreversível da floresta. Dentro desse processo, existe uma rede complexa de atores estatais e não-estatais incentivando o aumento do desmatamento, a presença de garimpeiros, pecuaristas, madeireiros, tráfico e outras atividades ilegais na região que, com o desmonte proposital da legislação de proteção ambiental e de organismos de fiscalização e proteção, fica sujeita a impactos significativos em seus ecossistemas (UNODC, 2023).

Logo, é preciso que haja no País legislação que responsabilize governos e empresas pela destruição que venham a ocasionar na região, zelando pela proteção de sua biodiversidade. Mesmo assim, pensar a manutenção da soberania brasileira na Amazônia demanda a preparação para cenários em que a legislação ambiental e a fiscalização possam não dar conta dessas ameaças. De acordo com Marcelo Campello (2013, p. 135), “a região, para alguns, é um espaço geopolítico estratégico como regulador das possíveis [sic] mudanças climáticas e, para outros, uma fronteira econômica amplamente cobiçada pelas metrópoles brasileiras e por potências e corporações internacionais”. Neste contexto, o Brasil precisa se preparar para um cenário em que as mudanças climáticas possam, por exemplo, justificar ações predatórias de empresas ou intervenções militares de outros Estados em áreas consideradas estratégicas globalmente, como é o caso da Amazônia.

“Pensar a manutenção da soberania brasileira na Amazônia demanda a preparação para cenários em que a legislação ambiental e a fiscalização possam não dar conta dessas ameaças.”



2.

Surpresas estratégicas e capacidades de defesa na guerra do futuro: projetos de Defesa sustentáveis

Diante do grau de incertezas deste novo século, tanto em tempos de paz quanto em tempos de guerra, os Estados têm que estar constantemente preparados e capacitados para lidar com ameaças à soberania nacional das mais diversas proporções, e entre elas, encontram-se as mudanças climáticas. Nesta seção serão apresentadas iniciativas relacionadas à sustentabilidade e à eficiência energética em curso no mundo e no Brasil, bem como os impactos do desenvolvimento de novas tecnologias verdes e de estratégias de mitigação e adaptação para a Defesa e para as Forças Armadas.

2.1. Como outros países tratam a interseção entre defesa, eficiência energética e sustentabilidade?

Para manter uma defesa efetiva, os Estados devem realizar investimentos constantes para que suas Forças Armadas estejam preparadas e capacitadas para evitar surpresas estratégicas. Os Estados que estão na dianteira do desenvolvimento de combustíveis sustentáveis para emprego militar associam o aumento de eficiência energética² com o aumento de vantagem operacional nos teatros de operação (Reino Unido, 2024). Uma das inovações lançadas neste Estudo é exatamente associar o aumento da eficiência energética, por meio do emprego de combustíveis sustentáveis, às surpresas estratégicas na condução das guerras.

2. A análise da eficiência energética é um estudo da Termodinâmica que auxilia na melhoria da eficiência de um meio que faz uso de alguma fonte de energia. Neste estudo em específico, a análise da eficiência energética é presumida, à medida que a maior parte das inovações tecnológicas tratadas aqui ainda estão, ou sendo testadas pelos seus desenvolvedores e possíveis clientes, ou no início de suas inserções mercadológicas.

O conceito de surpresa estratégica pode ser compreendido como “a percepção repentina de que se está operando com base em uma percepção errônea de ameaça. Ocorre através da incapacidade de prever, e muito menos de antecipar, uma ameaça externa aguda e imediata aos interesses nacionais vitais” (Brustlein, 2008, p. 11 *apud* Macedo, 2015, p. 23). As Forças Armadas poderão ser surpreendidas por inimigos que ameacem a soberania de seus Estados com tecnologias militares que empregam fontes de energia de baixo carbono com poder dissuasório mais eficaz e eficiente que as que empregam combustíveis de origem fóssil, modificando tanto as linhas de produção quanto o *modus operandi* das guerras, minando a prontidão militar e impondo custos cada vez mais insustentáveis à Defesa.

“As Forças Armadas poderão ser surpreendidas por inimigos que ameacem a soberania de seus Estados com tecnologias militares que empregam fontes de energia de baixo carbono com poder dissuasório mais eficaz e eficiente que as que empregam combustíveis de origem fóssil, modificando tanto as linhas de produção quanto o *modus operandi* das guerras, minando a prontidão militar e impondo custos cada vez mais insustentáveis à Defesa.”

No caso americano, a título de ilustração, isso também se reflete de forma considerável no Departamento de Defesa (DOD), que apesar de ser o maior usuário de energia do governo, possui apenas 6,5% da eletricidade gerada por fontes de energia renováveis, “o que está muito aquém da média nacional de cerca de 20%” (Harlow, 2023, p. 1). Conforme o Relatório de Progresso do Plano de Adaptação Climática de 2022, o atual governo estadunidense acredita que, “nos próximos anos, os países mais resilientes e mais bem preparados para gerir os efeitos das alterações climáticas obterão vantagens de segurança significativas” (EUA, 2022, p. i), corroborando com o exposto anteriormente.

O DOD, por exemplo, determinou que as alterações climáticas são uma questão crítica para a segurança nacional dos EUA à medida que impactam nas operações militares, degradam as instalações e a resiliência das infraestruturas, aumentam os riscos para a saúde dos militares estadunidenses e exigem modificações nas necessidades de equipamento existentes e planejados. Desta maneira, o Departamento responde às mudanças climáticas de duas formas: adaptação para aumentar a resiliência aos efeitos das alterações climáticas, com o objetivo de “garantir que as forças militares dos Estados Unidos mantenham a vantagem operacional em todas as condições, alavancando a eficiência e a resiliência para garantir que as nossas forças sejam ágeis, capazes e eficazes” (EUA, 2021, p. 3, tradução nossa); e mitigação para reduzir as emissões de gases de efeito estufa. No novo planejamento do DOD para se adaptar às mudanças climáticas, as ações foram substituídas por linhas de esforço (LOEs, na sigla em inglês), metodologias de implementação foram substituídas por áreas focais e metas foram substituídas por resultados, conforme figura 1 a seguir.

Figura 1. Estrutura da Estratégia de Adaptação Climática do DOD para Decisões de Força Atuais e Futuras



Fonte: EUA, 2021, p. 4 (adaptado)

Em virtude de as mudanças climáticas impactarem também as empresas fornecedoras, na LOE de resiliência e inovação da cadeia de suprimento, o DOD “considera o apoio logístico às cadeias de abastecimento (por exemplo, necessidades de combustível e energia), especialmente em locais austeros que são mais vulneráveis aos efeitos das alterações climáticas” EUA, 2021, p. 16, tradução nossa). Entre as áreas focais, se encontram o fortalecimento e a mudança onshore, ou seja, desenvolver um plano priorizado para proteger e mudar as cadeias de abastecimento e componentes críticos de fabricação estadunidense, especialmente, a resiliência da última milha³. Outra área focal é o aproveitamento do poder de compra, a partir do qual o DOD estimula a implantação de tecnologias de mitigação climática, como microrredes e armazenamento de energia, priorizando o uso de tecnologias de construção que sequestram carbono. Há também incentivo para fornecedores tratarem suas vulnerabilidades às mudanças climáticas como fraqueza material em seus relatórios financeiros, bem como o compromisso destes com a transparência pública sobre emissões de gases de efeito estufa em suas operações comerciais (EUA, 2021).

Já em alusão às oportunidades, o DOD busca avaliar as vulnerabilidades relacionadas às alterações climáticas nos seus próprios fornecedores para evitar que seus adversários as explorem para eventuais ganhos de curto e longo prazo, e orienta que as aquisições de sistemas de defesa incluam uma abordagem de ciclo de vida para quantificar responsabilidades, como impactos nas alterações climáticas por meio de emissões de gases de efeito estufa ou na aquisição do sistema de defesa. Outro ponto é a atenção especial às questões referentes às cadeias de abastecimento da última milha nos teatros de operações, como acesso rodoviário, engarrafamentos, armazenamento, entrega etc, a fim de evitar a fragilidade nos planos militares. Por fim, outra oportunidade considerada pelo DOD é que as aquisições sustentáveis melhoram e sustentam a prontidão para as missões por meio de compras que alcancem a conformidade, evitem a poluição, garantam a disponibilidade do produto e minimizem os impactos ambientais, de segurança e de saúde ocupacional do combatente (EUA, 2021).

“O engajamento mais pronunciado dos Estados Unidos nesta pauta advém da consciência de que alterações climáticas, como os efeitos de inundações e temperaturas extremas e secas, podem impactar tanto em operações de combatentes quanto nas mais de 2.300 bases estadunidenses em todo o mundo.”

Em termos de avaliação, análise, e potenciais ajustes, o DOD desenvolveu uma Ferramenta de Avaliação do Clima (CAT, na sigla em inglês), a qual se configura como uma ferramenta geoespacial para apoiar avaliações de exposição às mudanças climáticas por meio de volumes de dados coletados da internet, como modelos climáticos globais, observações históricas e modelagem de inundações, em locais e instalações do DOD, tanto nacionais quanto internacionais. Esta ferramenta permite a integração de avaliações de exposição climática em nível de triagem em processos de planejamento de instalações militares de forma consistente em todas as missões operacionais do Departamento, sendo útil a longo prazo e para a tomada de decisões.

A ferramenta utiliza dados de eventos climáticos extremos passados (por exemplo, furacões, rastros de tornados) e os efeitos de mudanças futuras nos níveis do mar, inundações ribeirinhas, secas, temperaturas extremas, degradação da terra, demanda de energia e incêndios florestais para produzir indicadores de perigo. Os dados apoiam uma avaliação em nível de triagem da vulnerabilidade da instalação, expressa como uma combinação de exposição (designada pela ferramenta) e sensibilidade. Esta avaliação de alto nível é útil para o planejamento a longo prazo e para a tomada de decisões (EUA, 2023, p. 1, tradução nossa).

O engajamento mais pronunciado dos Estados Unidos nesta pauta advém da consciência de que alterações climáticas, como os efeitos de inundações e temperaturas extremas e secas, podem impactar tanto em operações de combatentes quanto nas mais de 2.300 bases estadunidenses em todo o mundo. Recentemente, o DOD anunciou que daria acesso a parceiros dos EUA a uma versão do CAT a fim de que esses países disponham da mesma qualidade no preparo e resiliência de suas bases militares (Lopez, 2023).

3. Traduzido do inglês, o conceito de *last mile* representa a última fase da entrega de um produto. Ou seja, o trajeto que vai do hub de distribuição até o consumidor final.

Mas não só os Estados Unidos que estão atentos às surpresas estratégicas associadas à sustentabilidade no setor de defesa. A atual guerra na Ucrânia tornou ainda mais evidente a dependência dos países europeus do gás natural russo e as oscilações dos preços do petróleo e do gás natural no mercado internacional. Apesar das sanções econômicas aplicadas pelos Estados do Ocidente, suas organizações financeiras ainda investem em combustíveis fósseis russos. O banco estadunidense JP-Morgan Chase & Co. e o banco europeu UniCreditSpA continuam investindo milhões de dólares na estatal russa Gazprom (Hsiang, 2023). A fim de sanar a dependência mencionada, a União Europeia tem definido como prioritárias as ações estratégicas para a diversificação das matrizes energéticas em direção às fontes de baixo carbono.

Neste sentido, o teatro de operações ucraniano se tornou palco para financiamento, aprimoramento e diversos tipos de ensaios destrutivos e não destrutivos de tecnologias militares que empregam fontes de energias de baixo carbono e alternativas ao diesel, como veículos elétricos e bombas de calor totalmente elétricas (Alvarez, 2023). Atiradores de elite ucranianos estão utilizando motocicletas elétricas fabricadas em território nacional pela empresa Eleek Atom para avançar em operações em áreas hostis que exigem silêncio, leveza e agilidade⁴. Estes equipamentos se configuram como surpresa estratégica em meio à guerra devido à baixa assinatura térmica, possibilitando, portanto, aos atiradores de elite passarem despercebidos por drones russos. De acordo com a empresa ucraniana fabricante, o modelo Eleek Atom Military empregado na guerra tem autonomia de 150 km com carga de cinco horas, atinge a velocidade máxima de 90 km/h e tem capacidade para transportar até 150 kg⁵ (UOL, 2022).

“...o teatro de operações ucraniano se tornou palco para financiamento, aprimoramento e diversos tipos de ensaios destrutivos e não destrutivos de tecnologias militares que empregam fontes de energias de baixo carbono e alternativas ao diesel, como veículos elétricos e bombas de calor totalmente elétricas.”

Quanto ao emprego destas tecnologias no setor aeroespacial, em outubro de 2023, a Boeing anunciou que, em colaboração com a Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço (NASA, na sigla em inglês) e a empresa United Airlines, fariam testes em voos para avaliar como o combustível sustentável de aviação (SAF, na sigla em inglês) pode afetar os rastros de condensação, as emissões não relacionadas a carbono e reduzir o impacto climático do ciclo de vida do combustível no ecoDemonstrator Explorer 737-10, Boeing de propriedade da United Airlines. A Boeing anunciou também que o ecoDemonstrator será acompanhado pelo DC-8 Airborne Science Lab da NASA, a qual medirá as emissões produzidas por cada tipo de combustível e partículas de gelo das trilhas de condensação e que satélites da NASA também vão captar imagens da formação de rastros.

A Avaliação Anual de Impacto da OTAN sobre Mudanças Climáticas e Segurança de 2024 destaca como as mudanças climáticas afetam tecnologias e operações das forças navais por meio do aumento da temperatura do ar e do oceano, mudanças na salinidade e correntes, e o derretimento do gelo marinho. Utilizando supercomputadores, cientistas detectaram sinais de alerta para o colapso das correntes oceânicas, incluindo a Célula de Revolvimento Meridional do Atlântico (AMOC). Essas mudanças impactam a infraestrutura militar, a corrosão dos navios e o desempenho dos sensores e radares navais (OTAN, 2024).

Além disso, a pesquisa da OTAN indica consequências nas operações submarinas, incluindo dificuldades na detecção de submarinos devido à mudança na acústica subaquática. O aumento da acidificação e outras mudanças oceânicas afetam a transmissão sonora, dificultando a detecção de submarinos (OTAN, 2024). Essas alterações ressaltam a complexidade e os desafios que as mudanças climáticas trazem para a segurança marítima.

Como foi possível vislumbrar nesta seção, há um volume muito grande de investimentos em tecnologias voltadas para combater os efeitos das mudanças climáticas sendo feito por Estados desenvolvidos. Frente a este cenário, é necessário, portanto, entender como Estados em desenvolvimento,

4. Esta motocicleta elétrica pode ser empregada também em missões de reconhecimento, de transporte de pequenas cargas, de assistência médica a combatentes feridos e pode ser embarcada em meios de transporte fluviais, como botes e balsas, em áreas mais isoladas.

5. O perfil Visioner publicou em sua página oficial no X (antigo Twitter) um vídeo em 13 de maio de 2022 de um militar da Legião Nacional da Geórgia, unidade militar de voluntários da Geórgia na Ucrânia, dirigindo uma motocicleta elétrica Eleek Atom Military no leste da Ucrânia.

como o Brasil, têm atuado, e como suas Forças Armadas têm se preparado e se capacitado para lidar com estas adversidades.

2.2. E o Brasil nessa agenda? Temos um projeto de Defesa sustentável?

O Brasil é um Estado emergente e é um dos mais ativos nas convenções e fóruns globais relacionados à mudança do clima, com capacidade plena de protagonizar este processo, uma vez que é abundante em fontes de geração de energia de baixo carbono, terras cultiváveis e água potável, e que utiliza uma quantidade relativamente baixa de combustíveis fósseis na geração elétrica nacional.

A matriz elétrica brasileira é tida como uma das mais limpas do mundo, pela alta participação histórica da hidroeletricidade e o relativamente baixo percentual de energias fósseis na sua composição se comparada com a média mundial (...) historicamente as UHEs [usinas hidroelétricas] brasileiras foram construídas em rios de planalto em cascata, que implicam em impactos socioambientais bem menos significativos, em função do grande desnível e profundidade dos reservatórios, sem necessidades de alagar áreas extensas (Rached e Sá, 2022, p. 95).

Outro ponto se refere aos biocombustíveis⁶. Enquanto a produção mundial tem aumentado aceleradamente, tendo passado de 187 mil barris equivalentes a petróleo (BOE, na sigla em inglês) no ano 2000 para 1,8 milhão em 2019, o Brasil responde por cerca de 25% dessa produção, ficando atrás apenas dos Estados Unidos, que detêm 38% (Prauchner *et al.*, 2023). “Especificamente no setor de transportes, os biocombustíveis também já substituem 10% da necessidade de óleo diesel e cerca de 40% do consumo de gasolina” (Rodrigues, 2018, p. 4). Conceitualmente, biocombustíveis são combustíveis produzidos a partir de biomassas, matéria orgânica, animal ou vegetal, derivada de insumos agropecuários, como a cana-de-açúcar, soja, milho, sebo bovino, materiais graxos, dendê, macaúba, babaçu, palma, eucalipto etc. Além de serem uma fonte energética de baixo carbono, à medida que apresentam baixas proporções de enxofre, nitrogênio e aromáticos, os biocombustíveis são considerados renováveis porque são produzidos com insumos que podem ser reaproveitados, aumentando a sustentabilidade do processo.

Expressando uma realidade distinta da matriz energética brasileira, a maior parte das matrizes energéticas mundiais são compostas, principalmente, por fontes não renováveis, como carvão, petróleo e gás natural. De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), fontes renováveis como solar, eólica e geotérmica, correspondem juntas a apenas 2,7% da matriz energética mundial. Somando à participação da energia hidráulica e da biomassa, as renováveis totalizam aproximadamente 15%. Dados de 2022 disponibilizados pela EPE revelam que fontes renováveis compõem 47,4% da matriz energética brasileira.

Representando 1,3% da matriz energética nacional, e por ser uma fonte de recurso mineral esgotável, a geração de energia nucleoeleétrica não é renovável. No entanto, diferente de outras fontes, como carvão, petróleo ou gás natural, a geração de energia nucleoeleétrica não emite gases de efeito estufa na atmosfera; portanto, é limpa.

Com isso, a energia nuclear tem voltado ao centro dos debates globais sobre mudanças climáticas. De acordo com Wolfram Tonhauser, diretor do Escritório Jurídico da Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA), órgão subordinado à Organização das Nações Unidas (ONU), “muitos países estão pensando em aderir à tecnologia atômica para solucionar desafios de geração de energia, um movimento que não se via desde os anos de 1970” (ONU, 2023, p. 1). Segundo a AIEA, a energia atômica é segura e tem baixos níveis de emissões que causam o aquecimento global e, para alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, é necessário que as usinas nucleares sejam vistas pela opinião pública mais com base em dados científicos (ONU, 2023).

6. Conceitualmente, biocombustíveis são combustíveis produzidos a partir de biomassas, matéria orgânica, animal ou vegetal, derivada de insumos agropecuários, como a cana-de-açúcar, soja, milho, sebo bovino, materiais graxos, dendê, macaúba, babaçu, palma, eucalipto etc. Além de ser uma fonte energética de baixo carbono à medida que apresentam baixas proporções de enxofre, nitrogênio e aromáticos, os biocombustíveis são renováveis porque são produzidos com insumos que podem ser reaproveitados, aumentando a sustentabilidade do processo. Os reatores de água fervente (BWR) têm origem na década de 1950 e fizeram uso da tecnologia desenvolvida pela GE Hitachi Nuclear Energy (GEH) no plano de submarino nuclear projetado para marinha dos Estados Unidos. O primeiro reator deste tipo, construído na Califórnia em 1957, com geração de 5 MWe, confirmou a possibilidade de geração de eletricidade com sucesso e segurança. Os BWRs são adotados em países como os Estados Unidos, Japão, Alemanha, Finlândia, Rússia, Suíça e Suécia. (Soares *et al.*, 2019)

Até maio de 2019, existiam 447 reatores nucleares em operação em 30 países com capacidade instalada total de 398,154 MWe. Reforçando estes dados, em 2021, de acordo com a AIEA, mais de 30 países haviam introduzido ou estavam prestes a adotar a tecnologia atômica em seus programas de geração de energia, incluindo Gana e Polônia. Na COP-28, realizada nos Emirados Árabes, em 2023, a energia nuclear foi incluída pela primeira vez na declaração final da Conferência como uma opção para mitigar os efeitos das mudanças climáticas. Segundo especialistas, “o número de instalações nucleares para geração de energia terá que dobrar, nas próximas décadas, para que o mundo atinja sua meta de energia e de ação do clima” (ONU, 2023, p. 1). Considerando o impacto que as mudanças climáticas poderão causar na própria infraestrutura da segurança do abastecimento energético, o setor nuclear terá que se reinventar para garantir que seus sistemas alcancem as metas para mitigação esperadas, especialmente no marco do Acordo de Paris e da meta de impedir que a Terra se aqueça além de 1,5°C até o final do século XXI.

“Considerando o impacto que as mudanças climáticas poderão causar na própria infraestrutura da segurança do abastecimento energético, o setor nuclear terá que se reinventar para garantir que seus sistemas alcancem as metas para mitigação esperadas, especialmente no marco do Acordo de Paris e da meta de impedir que a Terra se aqueça além de 1,5°C até o final do século XXI.”

A este respeito, cada país signatário deste Acordo estabeleceu metas de redução de emissão de gases de efeito estufa, denominadas Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC, na sigla em inglês). A NDC atualizada do Brasil estabelece que o País deve reduzir as suas emissões em 48% até 2025 e 53% até 2030, em relação às emissões de 2005. Além de se responsabilizar com a redução das emissões de gases de efeito estufa, o Brasil reafirmou o compromisso de compensar todo gás de efeito estufa que emitir com fontes de captura de carbono, como por exemplo a restauração de mais de dez milhões de hectares de florestas, o aumento da participação de biocombustíveis na sua matriz energética ou a substituição por outras tecnologias que emitam baixo ou zero carbono, ressaltando a importância destas alternativas aos combustíveis fósseis. Com efeito, o Conselho Nacional de Política Energética (CNPE), subordinado ao Ministério de Minas e Energia (MME), por meio da Resolução CNPE nº 07, de 20 de abril de 2021, instituiu o Programa Combustível do Futuro e criou o Comitê Técnico Combustível do Futuro (CT-CF). A partir das experiências bem-sucedidas no Brasil com tecnologias verdes, envolvendo, por exemplo, o etanol, o biodiesel e o RenovaBio, o programa Combustível do Futuro tem buscado ampliar ainda mais o uso de combustíveis sustentáveis e com emissões de baixo carbono com os seguintes objetivos:

1. integrar políticas públicas afetas ao tema, como RenovaBio, Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel, Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (Proconve), Rota 2030, Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular e o Programa Nacional da Racionalização do Uso dos Derivados de Petróleo e do Gás Natural (CONPET);
2. propor medidas para melhoria da qualidade dos combustíveis, com vistas a promover redução da intensidade média de carbono da matriz de combustíveis, da redução das emissões em todos os modos de transporte e do incremento da eficiência energética;
3. propor metodologia de análise de ciclo de vida completo (do poço à roda) nos diversos modos de transporte;
4. avaliar a possibilidade de aproximação dos combustíveis de referência aos combustíveis efetivamente utilizados;
5. propor ações para fornecer ao consumidor as informações adequadas, de modo a contribuir para a escolha consciente do veículo e da fonte de energia considerando o ciclo de vida dos combustíveis;
6. propor estudos para criação de especificação de gasolina de alta octanagem;
7. propor estudos para viabilizar tecnologia de célula a combustível a etanol;

8. avaliar condições para introdução de querosene de aviação sustentável na matriz energética brasileira;
9. estabelecer estratégia nacional para uso de combustíveis sustentáveis no transporte marítimo; e
10. estabelecer condições para uso de tecnologia de captura e armazenamento de carbono associada à produção de biocombustíveis.

Dentre os combustíveis sustentáveis destacados no âmbito deste Programa, é possível citar: hidrogênio, metanol verde, *biobunker* (mais conhecido como combustível marítimo), amônia verde, diesel renovável, tecnologias de captura e armazenamento de CO₂, etc. A sustentabilidade e a viabilidade dos combustíveis sustentáveis dependem dos insumos utilizados e processos empregados. Diversos relatórios surgiram a partir dos subcomitês do CT-CF tal como o de “Combustíveis Marítimos”, o de “Análise Econômica de Diferentes Rotas de Produção de Combustíveis Sustentáveis de Aviação” e o de “Avaliação Técnica dos Requisitos para Desenvolvimento da Tecnologia de Célula Combustível a Etanol”. O Ministério da Defesa (MD) não integrou o CT-CF, mas as Forças Armadas brasileiras foram convidadas pelo MME para integrar alguns dos subcomitês.

Em setembro de 2023, o governo enviou ao Congresso Nacional projeto de lei que dispõe sobre a promoção da mobilidade sustentável de baixo carbono, no qual são apresentados o Programa Nacional de Combustível Sustentável de Aviação, o Programa Nacional de Diesel Verde e o marco legal da captura e da estocagem geológica de dióxido de carbono. O projeto de lei prevê regulamentação e fiscalização destas atividades, bem como disposições específicas sobre a mistura de combustíveis, reduzindo o percentual de combustíveis fósseis na composição final. Em seu texto, o PL 4.516/2023

- I - institui o Programa Nacional de Combustível Sustentável de Aviação - ProBioQAV;
- II - institui o Programa Nacional de Diesel Verde - PNDV;
- III - altera os limites máximo e mínimo do teor de mistura de etanol anidro à gasolina C comercializada ao consumidor final;
- IV - dispõe sobre a regulamentação e a fiscalização da atividade de captura e estocagem geológica de dióxido de carbono;
- V - dispõe sobre a regulamentação e a fiscalização da atividade de produção e comercialização dos combustíveis sintéticos; e
- VI - integra iniciativas e medidas adotadas no âmbito da Política Nacional de Biocombustíveis - RenovaBio, do Programa Rota 2030 — Mobilidade e Logística e do Programa Brasileiro de Etiquetagem — PBE Veicular (Brasil, 2023a, p.1).

Atualmente, a mistura de etanol à gasolina pode chegar até a 27,5%. O mínimo permitido é de 18% de etanol. A partir da aprovação desse projeto de lei, a nova margem de mistura passará de 22% a 27% e com possibilidade de chegar a 35%. Questão similar deve se aplicar ao diesel verde. Diferente do biodiesel, o diesel verde é produzido por meio de um processo de transformação de diferentes matérias-primas renováveis, como gorduras de origem vegetal e animal, cana-de-açúcar, etanol, resíduos e outras biomassas, em um combustível de baixa emissão de carbono. O resultado é um combustível altamente eficiente com emissão de CO₂ significativamente menor.

No Brasil, o Programa Nacional do Diesel Verde (PNDV) incentiva a pesquisa, a produção, a comercialização e o uso desse biocombustível. O CNPE fixará ano a ano, até 2037, a quantidade mínima de volume de diesel verde a ser adicionado ao diesel de origem fóssil. Além deste programa, cabe ressaltar que a nova política pública sob liderança do MME estimula a PD&I de tecnologias verdes, fomenta o adensamento da cadeia produtiva de combustíveis sustentáveis, e prevê a adoção gradual destes combustíveis em veículos movidos a combustíveis fósseis em todo território nacional, criando oportunidades para o desenvolvimento e o crescimento econômico brasileiro, bem como mais empregos no setor de combustíveis sustentáveis a partir da diversificação de suas aplicações.

O transporte marítimo em geral, por exemplo, depende essencialmente de combustíveis derivados do petróleo e, conseqüentemente, produz emissões de dióxido de carbono (CO₂), óxidos de enxofre (SO_x), óxidos de nitrogênio (NO e NO₂ - NO_x), material particulado, entre outros. “Eles se misturam com a atmosfera, podendo alterar a sua composição química, contribuindo de maneira significativa para a diminuição da qualidade do ar, repercutindo na saúde pública e no clima” (Hora e Silva, 2015, p. 17).

Atualmente, no Brasil, o transporte marítimo representa “aproximadamente 4,5% das emissões de carbono, 4% das emissões de óxidos de enxofre e 7% das emissões de óxido de nitrogênio” (Hora e Silva, 2015, p. 5). O mar é a principal rota de transporte do comércio brasileiro e o aumento da circulação da economia nacional por meio deste modal de transporte aumentará a emissão destes gases de efeito estufa na atmosfera, gerando mais pressões nacionais e internacionais para que o governo brasileiro tome providências para aumentar o uso sustentável do mar e mitigar os danos à saúde humana e ao meio ambiente.

“O mar é a principal rota de transporte do comércio brasileiro e o aumento da circulação da economia nacional por meio deste modal de transporte aumentará a emissão destes gases de efeito estufa na atmosfera, gerando mais pressões nacionais e internacionais para que o governo brasileiro tome providências para aumentar o uso sustentável do mar e mitigar os danos à saúde humana e ao meio ambiente.”

Corroborando com este contexto no âmbito internacional, em primeiro de janeiro de 2020, a Organização Marítima Internacional (IMO, na sigla em inglês) estabeleceu redução de limite para a quantidade de óxido de enxofre (SO_x) em combustíveis marítimos de 3,5% para 0,50% (ONU, 2019). Esta agência da ONU é responsável pelo desenvolvimento e adoção de normas de prevenção da poluição causada pelos navios, e pela garantia da proteção, da segurança e da eficiência do transporte marítimo. Outra iniciativa internacional é a proposta da Câmara Internacional de Navegação (ICS, na sigla em inglês), entregue pelos governos das Bahamas e Libéria à IMO em fevereiro de 2024, para criar um fundo destinado a financiar combustíveis e tecnologias de zero emissão de carbono. Esta iniciativa demanda até 28 bilhões de dólares por ano até 2050, visando a substituição de combustíveis fósseis no transporte marítimo global. A ICS representaria mais de 80% da frota mercante global.

A Marinha do Brasil é constantemente acionada para solucionar problemas relacionados a desastres ambientais no mar e realiza Ações Cívico Sociais (ACISOs) — tais como assistência médico-hospitalar, odontológica e sanitária — às populações ribeirinhas, às populações em faixa de fronteira e em operações de socorro e atividades de defesa civil. Todos os navios da Marinha do Brasil utilizam combustíveis fósseis. Entretanto, ao mesmo tempo que esta Força se torna solução para a resolução de problemas socioambientais, também pode ser parte do problema. Além da possibilidade de haver vazamentos de óleo marítimo de navios de guerra no mar territorial, ao realizar as ACISOs em águas interiores do País, os motores de navios de assistência hospitalar, em função da emissão de gases tóxicos à saúde humana, podem contribuir para gerar doenças e provocar até mortes em comunidades ribeirinhas, em populações em faixas de fronteira e em suas próprias tripulações.

Em entrevista recente (2023), o atual comandante da Marinha do Brasil, Almirante de Esquadra Marcos Sampaio Olsen, informou o seguinte:

A disponibilidade de meios operativos — navios, aeronaves e meios de Fuzileiros Navais — é uma variável que deve ser analisada com base no fator tempo. Em razão do limite da vida útil, 43 embarcações da Marinha do Brasil devem ser desativadas até 2028, o que corresponde a aproximadamente 40% dos meios operativos da Força. Essa expectativa pode sofrer variações de acordo com avaliações técnicas da estrutura e das condições operativas dos navios, sem alterar significativamente, contudo, o quadro geral desse cenário. A baixa de um meio sem a correspondente recomposição pode implicar à degradação de capacidades da Força Naval e sua prontidão para atender a diversas tarefas previstas, em particular aquelas voltadas à defesa da soberania, à segurança marítima, ao atendimento de tratados internacionais dos quais o Brasil é signatário e ao apoio às ações do Estado, como calamidades públicas, assistência às populações ribeirinhas e combate a crimes transfronteiriços e ambientais (Fan, 2023, p. 2).

A Marinha do Brasil deverá acionar o programa “Construção do Núcleo do Poder Naval” para criar novos subprogramas e projetos de construção naval que substituam as 43 embarcações que deverão ser desativadas até 2028. Estes novos subprogramas e projetos de construção naval já podem ter a sua construção repensada no âmbito da nova agenda sustentável brasileira, com infraestrutura adaptável aos fenômenos das mudanças climáticas e apropriada para consumo de combustíveis sustentáveis. Em janeiro de 2024, o Banco Nacional do Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) anunciou a redução de taxas de juros para modernização da frota naval brasileira no âmbito do programa “BNDES Azul”⁷, justamente a fim de fomentar a produção de navios nacionais que utilizem combustíveis sustentáveis. Esses recursos poderão também ser usados para a modernização da frota naval movida a combustíveis fósseis.

“A dependência da Marinha do Brasil de combustíveis fósseis pode pôr em risco a soberania e a defesa nacional, à medida que, hipoteticamente, a suspensão ou o corte no fornecimento deste combustível à Força Naval pode comprometer obtenções de capacidades de defesa no mar territorial — em especial, as de controle de áreas marítimas, as de projeção de poder e as de negação do uso do mar.”

A dependência da Marinha do Brasil de combustíveis fósseis pode pôr em risco a soberania e a defesa nacional, à medida que, hipoteticamente, a suspensão ou o corte no fornecimento deste combustível à Força Naval pode comprometer a obtenção de capacidades de defesa no mar territorial — em especial, as de controle de áreas marítimas, as de projeção de poder e as de negação do uso do mar.

A despeito desta questão, existem mecanismos no âmbito do Ministério da Defesa que versam acerca da proteção do meio ambiente, à preservação, à sustentabilidade, à recuperação e às operações em apoio ao meio ambiente. Segundo o Livro Verde de Defesa, publicado em 2017, a posição do MD no que se refere à sustentabilidade é:

consumir indefinidamente, sem exaurir os estoques naturais. Esta é a melhor maneira de se compreender o conceito de sustentabilidade. E o que deve limitar o desenvolvimento não é a capacidade de produção dos homens e das suas máquinas, mas o capital natural remanescente em torno delas, como as florestas e as águas. Outro aspecto importante é o controle do desperdício e a eficiência na utilização dos recursos disponíveis. É preciso habitar, sem agredir o meio ambiente e consumir de forma assertiva. É esta noção de sustentabilidade que permeia a gestão assertiva das ações militares empreendidas pelas Forças Armadas brasileiras sob três perspectivas específicas: o uso ideal da energia, o manuseio de resíduos e substâncias e a maneira como as instalações militares são construídas e mantidas (Brasil, 2017, p.26).

Um dos exemplos implantados à época foi a utilização de energia solar pela FAB para abastecer alguns Destacamentos de Controle do Espaço Aéreo (DTCEA) em regiões isoladas do norte do País. Além disso, houve a implantação de projeto-piloto de geração de energia fotovoltaica, produzida a partir de luz solar, no Quartel-General do Exército (QGEx), em Brasília (DF), em abril de 2016, conforme ilustra a figura 2 abaixo.

7. Para conhecer mais sobre o BNDES Azul, acesse [aqui](#).

Figura 2. Placas fotovoltaicas no Quartel-General do Exército, em Brasília



Fonte: Brasil, 2017, p.28

Embora o MD e as Forças Armadas brasileiras manifestem preocupações com a descarbonização e maior sustentabilidade, é imprescindível que também manifestem maiores preocupações com o aumento da eficiência energética para pronto emprego dos meios tecnológicos e aumento das capacidades de defesa a fim de evitar surpresas estratégicas.

Diante das diversas inovações tecnológicas que estão sendo incentivadas e financiadas nacional e internacionalmente, é possível que surjam, em médio e longo prazo, novos combustíveis com maior ganho de eficiência energética em relação aos combustíveis fósseis, e que sejam capazes de aumentar as capacidades de defesa. No entanto, uma gestão eficiente de surpresas estratégicas ainda se faz imprescindível.

Neste contexto, ainda que o impacto das mudanças climáticas sobre o aumento do ganho de eficiência energética e das capacidades de defesa possam ser considerados “sinais fracos”, é imprescindível que o MD e as Forças Armadas brasileiras coletem informações e as estruturam e monitorem constantemente a fim de evitar que as mudanças climáticas se tornem ameaças à soberania e aos interesses nacionais, e para aproveitar as oportunidades que surgirão. O conceito de “sinais fracos” advém do artigo intitulado “Managing Strategic Surprise by Response to Weak Signals” de H. Igor Ansoff em 1975. De acordo com o autor, “a inocuidade da estratégia corporativa ao garantir a sobrevivência das organizações advém da sua falta de aptidão para gerenciar as surpresas e a dificuldade dessas corporações ao se portarem diante das descontinuidades estratégicas” (Ansoff, 1975 *apud* Nunes, 2020).

Superando os modelos tradicionais de planejamento estratégico baseados em ameaças, o MD tem adotado a metodologia do Planejamento Baseado em Capacidades (PBC) para subsidiar a Sistemática de Planejamento Estratégico Militar (SPEM). Esta metodologia está voltada para

o preparo do Setor de Defesa, mediante a obtenção de capacidades (aquisição ou desenvolvimento) adequadas ao atendimento das necessidades militares de defesa do Estado, em um horizonte temporal definido, observados os cenários prospectivos e os limites orçamentários e tecnológicos (Brasil, 2022d).

“Embora o MD e as Forças Armadas brasileiras manifestem preocupações com a descarbonização e maior sustentabilidade, é imprescindível que também manifestem maiores preocupações com o aumento da eficiência energética para pronto emprego dos meios tecnológicos e aumento das capacidades de defesa a fim de evitar surpresas estratégicas”

Os desafios e as capacidades de defesa requeridas pelo MD e pelas Forças Armadas serão identificadas no Cenário Militar de Defesa (CMD) e, na sequência, poderão avaliar suas interações a fim de alcançar uma configuração de força adequada à diversas Possibilidades de Atuação do Poder Militar (PA). “Esses Desafios devem ser entendidos sob dois aspectos: o primeiro, como eventuais oponentes identificados nos Descritores de PA; e o segundo, como missões a serem executadas pelo Setor de Defesa” (Brasil, 2022d).

Como dito anteriormente, combustíveis sustentáveis certamente podem se configurar como surpresas estratégicas na guerra do futuro à medida que podem aumentar a eficiência energética dos meios militares, como navios, submarinos, aviões militares, veículos leves e carros de assalto. O ganho em eficiência energética nestes meios pode conferir ao Brasil aumento significativo das capacidades de defesa e, em cenários hipotéticos de guerra, incrementar suas capacidades militares de defesa, as quais incluem o poder de enfrentamento, a sustentação, o comando e controle, o domínio da informação, a proteção, a projeção de poder, a pronta resposta e o apoio às ações de Estado (Brasil, 2022d).

A partir da compreensão das surpresas estratégicas associadas às mudanças do clima e dos cenários de guerra do futuro discutidos nesta seção, o principal objetivo deste Estudo é analisar e avaliar os desafios e oportunidades do emprego de combustíveis sustentáveis em tecnologias militares que preencham os requisitos necessários para substituir os combustíveis fósseis. Daí compreender a importância dos estudos de futuro e do emprego de ferramentas metodológicas de prospecção tecnológica para auxiliar processos decisórios na adoção de tais combustíveis.



3.

Prospecção tecnológica de combustíveis sustentáveis: ferramentas e métodos

Prospecção tecnológica é o estudo sistemático de mapeamentos de tecnologias futuras capazes de influenciar significativamente a indústria, a economia e a sociedade, facilitando a construção de soluções plausíveis para um futuro hipotético (Kupfer e Tigre, 2004 *apud* Corrêa, 2021b). Ao agregar valor às informações do presente fazendo uso de métodos qualitativos, quantitativos e quali-quantitativos por meio de pesquisas científicas e desenvolvimento de projetos tecnológicos, a prospecção tecnológica subsidia e influencia os tomadores de decisão e formuladores de políticas públicas em seus planos estratégicos de inovação, identificando ameaças e oportunidades em futuros hipotéticos. Existem diversas ferramentas e métodos de prospecção que contribuem com maior precisão na tomada de decisão, na definição de prioridades e na capacidade de reação e antecipação. A ferramenta de substituição tecnológica é identificada como a mais apropriada para este Estudo.

Os Estados podem fomentar e financiar, mas os processos de substituição tecnológica ocorrem dentro das empresas, de forma parcial ou total. Eles podem acontecer dentro da própria empresa que desenvolveu a inovação tecnológica ou na empresa que recebe como insumo a inovação desenvolvida. É possível, ainda, que uma subsidiária ou um *spin-off* substitua a inovação desenvolvida pela empresa matriz.

Dependendo do modelo, a substituição tecnológica pode promover crescimento econômico, melhorar as condições de trabalho e a qualidade de vida, reduzir o tempo de ocupação na produção de bens ou serviços, otimizar a automatização dos meios de produção e implantar novos processos educacionais e organizacionais na empresa. No entanto, para fins de viabilidade da substituição, é necessário considerar investimentos iniciais em Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) para ganho de escala produtiva. O custo marginal de uma techno-

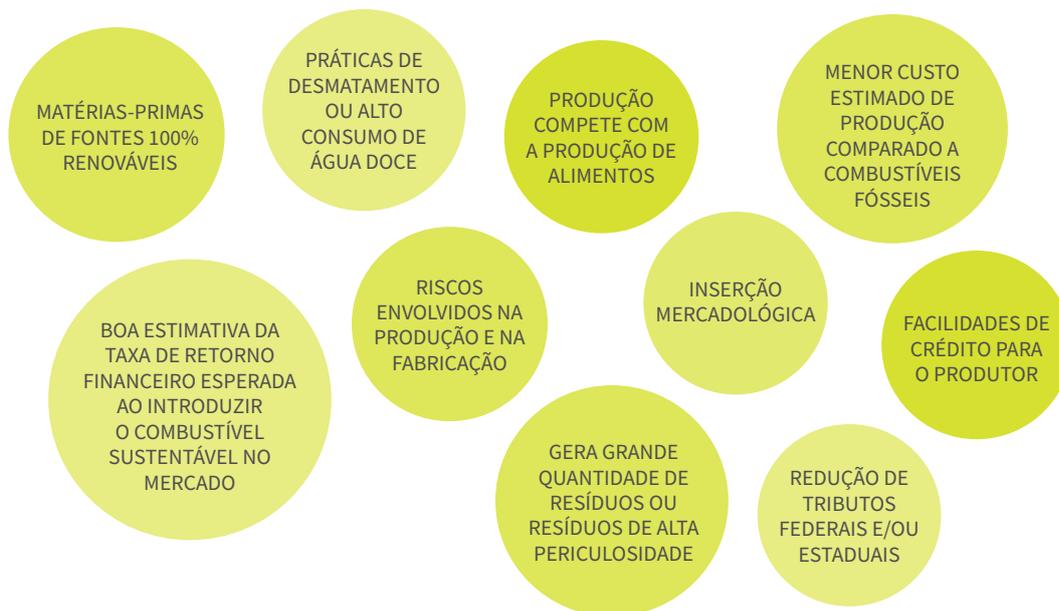
“...a prospecção tecnológica subsidia e influencia os tomadores de decisão e formuladores de políticas públicas em seus planos estratégicos de inovação, identificando ameaças e oportunidades em futuros hipotéticos.”

logia é reduzido de forma sistemática após uma fase de grandes investimentos iniciais em P&D e um mercado incipiente. Quanto mais a tecnologia for adotada, mais ela se torna barata e menores são os riscos de incerteza (Balestieri, 2014).

Por outro lado, inovação tecnológica, mudanças nos custos relativos e na qualidade e/ou redução da quantidade de usuários são fatores responsáveis pelo início do processo de declínio de uma tecnologia, oportunizando sua substituição. No entanto, convém ressaltar que a substituição não necessariamente acompanha a incerteza quanto à demanda futura (Porter, 2004).

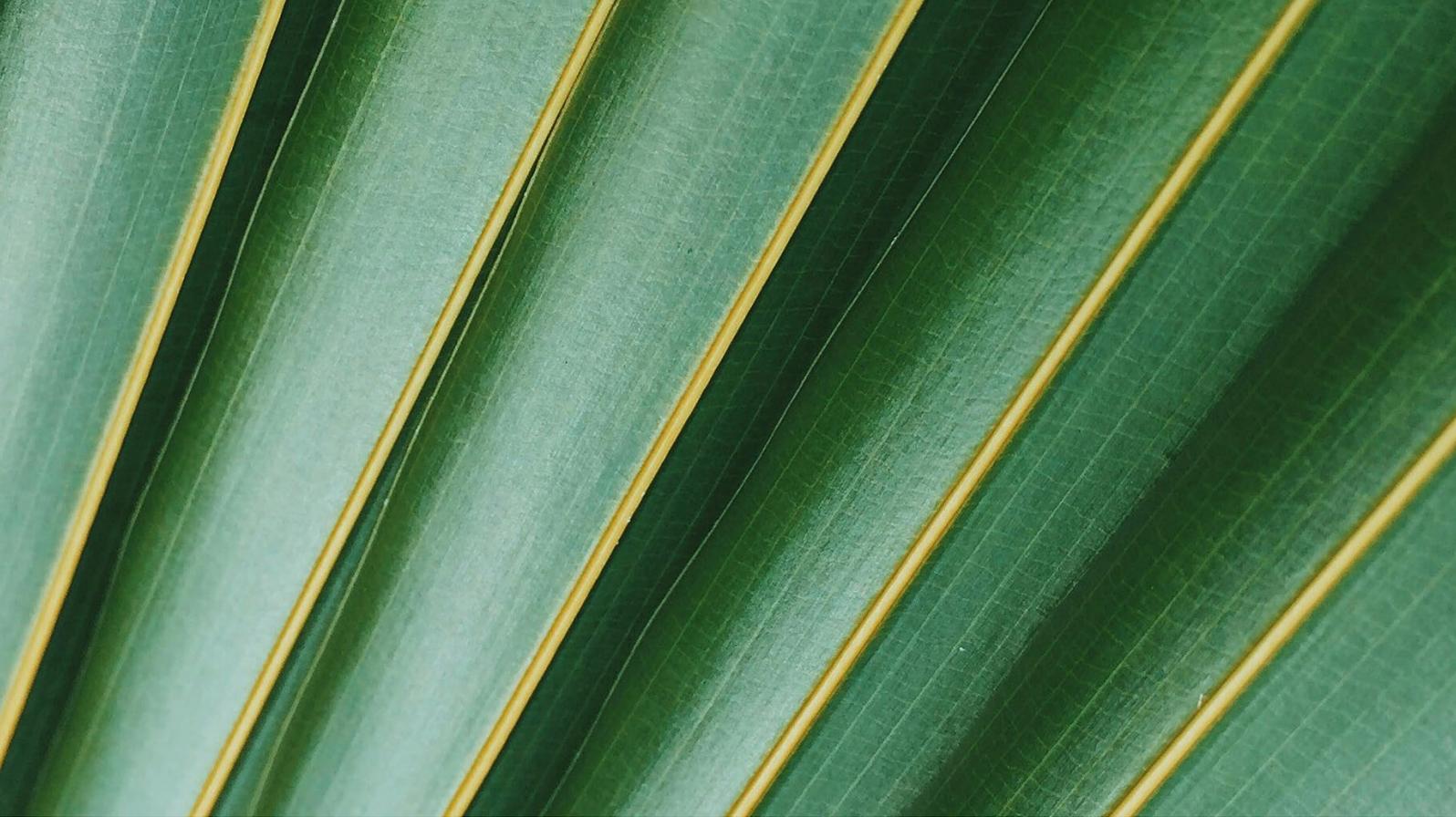
Com base nos dados e informações extraídos da literatura científica utilizada neste Estudo, foram elaborados dez critérios para analisar e avaliar quais fontes energéticas de baixo carbono podem ser enquadradas como combustíveis sustentáveis, conforme disposto no figura 3.

Figura 3. Critérios para enquadramento de fontes energéticas de baixo carbono como combustíveis sustentáveis



Fonte: Elaborado pela autora, com base em nos dados e informações extraídos da literatura científica utilizada neste Estudo

A seguir serão identificados os combustíveis inovadores que são considerados neste Estudo como sustentáveis. Entretanto, nem todos preenchem requisitos e reúnem as condições necessárias para substituir os combustíveis fósseis no transporte marítimo, aéreo e terrestre. A análise de substituição tecnológica será empregada para comparar e avaliar os requisitos e critérios que devem ser superados, a fim de que se destaquem os combustíveis sustentáveis com potencial de maior ganho de eficiência energética em comparação aos combustíveis fósseis.



4.

Combustíveis sustentáveis inovadores

Energias renováveis, armazenamento de energia e reatores nucleares são áreas tecnológicas de interesse da Defesa e cabe ao MD, por meio da Secretaria de Produtos de Defesa (SEPROD), apoiar o desenvolvimento de novas tecnologias e inovações em projetos de interesse da Defesa, estimulando o aprimoramento de políticas e programas de fomento à Base Industrial de Defesa (BID). Conceitualmente, a BID representa

o conjunto de órgãos e entidades, públicas e privadas, civis e militares, regidas pelo ordenamento jurídico brasileiro, que realizem ou conduzam pesquisas, projetos, desenvolvimento, industrialização, produção, reparo, conservação, revisão, conversão, modernização, manutenção, integração, desativação ou término de bens e serviços de defesa (Brasil, 2022c, p. 1).

As empresas brasileiras que compõem a BID devem se cadastrar no Sistema de Cadastramento de Produtos e Empresas de Defesa (SISCAPED), sistema gerenciado pela SEPROD. Ao se cadastrarem no SISCAPED, as empresas passam a dispor de benefícios tributários, promoção comercial de seus Produtos de Defesa (PRODE) ou Produtos Estratégicos de Defesa (PED) em eventos nacionais e internacionais, e participam com exclusividade de licitações das Forças Armadas e de editais de subvenção econômica, bem como de programas de fomento protagonizados pela Seprod junto com seus parceiros de Ciência, Tecnologia & Inovação (CT&I).

Dentre as empresas brasileiras cadastradas no SISCAPED, há três que desenvolvem combustíveis sustentáveis: Petrobras, Bnpetro Holding Brasil S/A e Indústrias Nucleares do Brasil (INB). Além dos biocombustíveis, a Petrobras também está envolvida na produção de hidrogênio verde e de energia eólica *offshore*. A Bnpetro, que possui planta industrial instalada em Itajaí, em Santa Catarina, produz combustíveis sintéticos sustentáveis com capacidade de processamento de 120 a 230 kg/h de resíduos sólidos. A Bnpetro também produz propelentes poliméricos para foguetes, que são combustíveis sustentáveis gerados a partir de resíduos. Ambos os combustíveis sustentáveis da Bnpetro são classificados com o selo de PED pelo SISCAPED.

A INB produz combustível nuclear para o Laboratório de Geração de Energia Nucleoelétrica (LABGENE), protótipo em terra do primeiro reator nuclear para propulsão do futuro submarino nuclear brasileiro. Dentre os serviços ou materiais fornecidos pela INB, foram classificados como PED: 1) o diuranato de amônio (U3O8), mais conhecido como *yellowcake*, 2) fabricação e fornecimento de elemento combustível para reatores nucleares, 3) fabricação e fornecimento de pastilhas de UO2 e 4) urânio sob a forma de hexafluoreto de urânio (UF6) (Brasil, 2022a).

Para os efeitos deste Estudo, as fontes de baixo carbono mais inovadoras para os setores de transporte marítimo, terrestre e/ou aéreo estão ilustradas na figura 4, disposta a seguir. As próximas seções discutirão mais a fundo os desafios e oportunidades para a adoção de cada um desses combustíveis no Brasil.

Figura 4. Combustíveis sustentáveis inovadores



Fonte: Elaborado pela autora

4.1. Hidrogênio

O hidrogênio pode ser extraído de combustíveis fósseis, de biomassas, da água, da combinação de ambos e pode ser produzido a partir da eletricidade através da eletrólise da água. Em virtude da diversidade de rotas tecnológicas para a produção, as quais possuem diferentes custos associados e intensidades variadas de carbono do processo, o hidrogênio ainda tem sido classificado em cores, conforme tabela 1 a seguir:

Tabela 1. Classificação de cores dos tipos de combustível hidrogênio

CLASSIFICAÇÃO POR COR	PROCESSO DE PRODUÇÃO
Branco	Extração de hidrogênio em seu estado natural ou geológico
Cinza	Produzido por reforma a vapor do gás natural sem CCUS ⁸
Amarelo	Energia da rede elétrica, composta de diversas fontes
Turquesa	Pirólise do metano, sem gerar CO2
Azul	Reforma a vapor do gás natural (eventualmente, de outros combustíveis fósseis) com CCUS
Verde	Produzido a partir da eletrólise da água com energia de fontes renováveis (particularmente, energia eólica e solar)
Musgo	Produzido por reformas catalíticas, gaseificação de plásticos residuais ou biodigestão anaeróbica de biomassa, com ou sem CCUS
Rosa	Oriundo de fonte nuclear
Marrom	Gaseificação do carvão mineral (hulha) sem CCUS
Preto	Gaseificação do carvão mineral (antracito) sem CCUS

Fonte: EPE, 2022, p.4 (Adaptado)

8. Na sigla em inglês, CCUS significa *Carbon Capture, Use, and Storage*, ou seja, se refere ao processo de captura, uso e armazenamento de carbono.

Dentre os mais comuns, o hidrogênio marrom é produzido a partir da gaseificação do carvão mineral (hulha), sem Captura, Uso e Armazenamento do Carbono (CCUS, na sigla em inglês) e o hidrogênio cinza é produzido a partir da reforma a vapor do gás natural, sem CCUS. Já o hidrogênio verde é gerado pela eletrólise da água a partir de fontes limpas, como eólica e solar.

No entanto, é importante alertar que essa definição por cores tende a mudar, especialmente tendo em vista os “Roteiros de Medidas para Hidrogênio Verde”, de autoria da Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA, na sigla em inglês) e o Fórum Econômico Mundial (IRENA, 2022). O documento versa a respeito das dinâmicas de certificação de baixo carbono associadas à produção de hidrogênio, visando estabelecer garantias de origem e facilitação aos mercados de importação emergentes (Oliveira, 2002).

O carvão e o gás natural, porém, continuam sendo as maiores fontes de produção de hidrogênio no mundo. Já quando produzido a partir da eletrólise da água, utilizando energia renovável, o hidrogênio pode se tornar um combustível sustentável para o transporte marítimo com baixa emissão de gases de efeito estufa. Em termos econômicos, trata-se de uma alternativa que pode se tornar vantajosa:

O custo do hidrogênio marrom e cinza varia entre US\$ 1-4/kg, enquanto o do hidrogênio verde atualmente varia entre US\$ 6-8/kg. No entanto, o custo de produção de hidrogênio reduziu cerca de 50% desde 2015 e essa tendência deve continuar na década seguinte, à medida que projetos de geração de energia renovável para aumentar a produção de hidrogênio sejam implementados. Estima-se que a redução do custo do hidrogênio verde para US\$ 2/kg pode torná-lo competitivo para uso no setor marítimo (IEA, 2019 *apud* Brasil, 2023c, p. 30).

Em janeiro de 2022, a Comissão Europeia produziu um documento intitulado “Construir um Espaço Europeu de Investigação para o Hidrogênio Limpo — o papel dos investimentos da UE em investigação e inovação para concretizar a Estratégia da UE para o Hidrogênio” (Comissão Europeia, 2022). O documento descreve os instrumentos relacionados à PD&I, ao financiamento e aos desafios e oportunidades para implantar no mercado, de curto a médio prazo e de forma plena, as tecnologias do hidrogênio e acelerar a criação da economia europeia em torno desta tecnologia. Foi o transporte terrestre que impulsionou o mercado de células a combustível de hidrogênio na Europa e, graças aos fomentos e financiamentos da União Europeia em inovação para o setor de transporte terrestre, a eficiência das células a combustível de hidrogênio triplicou em 15 anos e o tempo de reabastecimento reduziu em mais da metade.

O reforço da P&I [Pesquisa & Inovação] em todos os TRL [Níveis de Maturidade Tecnológica] será a pré-condição para aumentar a eficiência energética e reduzir os custos de toda a cadeia de valor do hidrogênio, através da utilização de toda a gama de instrumentos existentes, por exemplo, Horizonte Europa (nomeadamente o Conselho Europeu de Investigação, o Conselho Europeu de Inovação, os clusters Horizonte Europa) e o Instituto Europeu de Tecnologia e Inovação EIT (nomeadamente a sua Comunidade de Conhecimento e Inovação KIC InnoEnergy), e ligando esta cadeia aos programas de investimento dentro da UE, bem como fora (em particular o Fundo Catalisador e a capacidade de alavancagem da Missão Inovação) (UE, 2022, p. 8-9, tradução nossa).

“Os Vales de Hidrogênio na União Europeia atuam em todas as fases da cadeia produtiva, desde a produção e armazenamento, até a distribuição e utilização final do hidrogênio, tudo num único espaço.”

O documento destaca também as seguintes iniciativas: a criação das Empresas Comuns Pilhas de Combustível e Hidrogênio (Empresa Comum PCH); o papel de liderança da UE nos eletrolisadores para a produção de hidrogênio limpo; o papel fundamental da investigação e inovação na demonstração e preparação para a implantação no mercado; no fornecimento dos dados e ferramentas necessários à indústria; e no fornecimento de evidências para o ajuste necessário do ambiente regulatório; e, conforme a figura 5 a seguir, o estabelecimento de 21 Vales de Hidrogênio na Europa.

Os Vales de Hidrogênio na União Europeia atuam em todas as fases da cadeia produtiva, desde a produção e armazenamento, até a distribuição e utilização final do hidrogênio, tudo num único espaço.

A Empresa Comum PCH tem apoiado o desenvolvimento destes vales por meio do investimento de 35 milhões de euros e por meio da Assistência ao Desenvolvimento de Projetos (PDA, na sigla em inglês), que visa promover a participação de regiões, em particular do leste europeu, em iniciativas e projetos envolvendo hidrogênio.

Figura 5. Vales de Hidrogênio na Europa



Fonte: UE, 2022, p.4

Com os Vales de Hidrogênio, o mercado de hidrogênio tem se tornado uma das principais rotas tecnológicas substitutas de combustíveis fósseis na União Europeia. A este respeito,

A tendência mundial, liderada pelos países desenvolvidos, é promover o hidrogênio e a amônia como os combustíveis marítimos do futuro. Entretanto, como a produção desses combustíveis demanda muita energia, será necessária a geração de energia sustentável para suprir essa demanda, a fim de que a redução de emissões seja efetiva, avaliando todo o ciclo de vida do combustível. Nesse contexto, o Brasil, com um potencial enorme de geração de energia renovável (hidroelétrica, solar e eólica) desponta como promissor produtor, consumidor e exportador desses combustíveis. Além dessas alternativas, vislumbra-se que os biocombustíveis possam ter um papel importante na transição energética, até que o hidrogênio e amônia tornem-se realidade (Brasil, 2023c, p. 15).

Aproveitando o enorme potencial do Brasil de se destacar nesse mercado, o MME publicou a Resolução nº 6, de 23 de junho de 2022, do CNPE, que institui e estabelece a estrutura de governança do Programa Nacional de Hidrogênio (PNH2):

Entre os princípios que norteiam o PNH2, estão a valorização do potencial nacional de recursos energéticos, a abrangência de fontes energéticas, a descarbonização da economia, o incentivo ao desenvolvimento tecnológico nacional, a construção de um mercado competitivo de hidrogênio, o reconhecimento da indústria nacional e a busca de sinergias e articulação com outros países, buscando acelerar esta transição energética através da cooperação (Brasil, 2022b, p. 5).

Em virtude dos desafios tecnológicos e de mercado ao longo da cadeia energética, o CNPE instituiu o Conselho Gestor do Programa Nacional de Hidrogênio (Coges-PNH2), envolvendo diversos ministérios, a fim de aprovar o plano trienal para o hidrogênio como vetor energético. De acordo com a Portaria de Pessoal nº 164/GM/MME, de 17 de agosto de 2022, os ministérios e órgãos governamentais que foram designados para compor o Coges-PNH2 são: MME, Casa Civil da Presidência da República, Ministério da Economia, Ministério do Meio Ambiente, Ministério das Relações Exteriores, Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, Ministério do Desenvolvimento Regional, Ministério da Educação, Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento, Secretaria Especial de Assuntos Estratégicos da Presidência da República, Agência Nacional de Energia Elétrica, Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) e EPE. Nem o Ministério da Defesa, nem as Forças Armadas foram designadas para participar do Comitê, embora possam ser diretamente afetadas pelas deliberações no âmbito deste Programa.

É necessário ressaltar aqui um importante diagnóstico: “87% do hidrogênio que é produzido no Brasil atualmente é proveniente da reforma a vapor do gás natural, para consumo doméstico nas refinarias e nas fábricas de fertilizantes” (Brasil, 2023b, p.11). O hidrogênio é produzido através de métodos de processamento em altas temperaturas, superiores a 800°C. O Hidrocraqueamento Catalítico (HCC) e o Hidrotreatamento (HDT) são os dois maiores processos que consomem hidrogênio nas refinarias de petróleo. O HCC consome hidrogênio, gera reações de hidrogenação e quebra de moléculas para formar produtos com maior valor agregado. No HDT, o hidrogênio é empregado para remover impurezas, como enxofre e nitrogênio, e atender exigências relacionadas a tratamento de resíduos de combustíveis como gás natural, gasolina, diesel, querosene de aviação, querosene e óleos combustíveis.

“87% do hidrogênio que é produzido no Brasil atualmente é proveniente da reforma a vapor do gás natural, para consumo doméstico nas refinarias e nas fábricas de fertilizantes.”

Um estudo da EPE aponta que, “das 19 refinarias de petróleo autorizadas para operação no país, onze possuem Unidades de Geração de Hidrogênio [UGH]” (Brasil, 2023b, p.11). Três destas 19 refinarias foram privatizadas pelo governo brasileiro em 2022. Com a privatização destas refinarias pode ser que o número de UGH sob controle de empresas brasileiras tenha sido reduzido, o que pode impactar nossa segurança energética em termos de produção de combustíveis sustentáveis. A Refinaria Abreu e Lima (RNEST), por exemplo, foi projetada para produzir o Diesel S-10, diesel com baixo teor de enxofre, e possui duas UGH. Além do Diesel S-10, a RNEST produz nafta, óleo combustível, coque, e gás liquefeito de petróleo (GLP). Apesar dos diversos benefícios do emprego de hidrogênio como vetor energético, os desafios também são enormes e custosos.

A construção de uma Unidade de Geração de Hidrogênio é dispendiosa devido ao custo de aquisição de equipamentos, construção e montagem, integração de tubulações com demais unidades, especificação dos materiais necessários, entre outros. Para fins ilustrativos, uma unidade com capacidade de produção de hidrogênio de 2.860.000 Nm³/d (...) teve seu custo estimado em 135 milhões de dólares (Brasil, 2022b, p. 7).

Abaixo, é apresentada a tabela 2, com todas as 19 refinarias de petróleo brasileiras autorizadas pela ANP para operação em território nacional:

Tabela 2. Refinarias domésticas autorizadas para operação

REFINARIAS	LOCALIZAÇÃO	CAPACIDADE NOMINAL DE PROCESSAMENTO (MIL BARRIS/DIA)	UNIDADES DE GERAÇÃO DE HIDROGÊNIO (UGH)
Refinaria de Paulínia (REPLAN)	Paulínia (SP)	434	Tem UGH
Refinaria de Mataripe	São Francisco do Conde (BA)	337	Em processo de recuperação pela Petrobras
Refinaria Duque de Caxias (REDUC)	Duque de Caxias (RJ)	252	Não há informação
Refinaria Henrique Lage (REVAP)	São José dos Campos (SP)	252	Não há informação
Refinaria Presidente Getúlio Vargas (REPAR)	Araucária (PR)	214	Não há informação
Refinaria Alberto Pasqualini (REFAP)	Canoas (RS)	208	Tem UGH

Refinaria Presidente Bernardes (RPBC)	Cubatão (SP)	179	Não há informação
Refinaria Gabriel Passos (REGAP)	Betim (MG)	164	Tem UGH
Refinaria Abreu e Lima (RNEST)	Ipojuca (PE)	115	Tem UGH
Refinaria de Capuava (RECAP)	Mauá (SP)	63	Não há informação
Refinaria Isaac Sabbá (REMAN)	Manaus (AM)	46	Não há informação; Privatizada
Refinaria Potiguar Clara Camarão (RPCC)	Guamaré (RN)	38	Não há informação; Privatizada
Refinaria de Petróleo Riograndense (RPR)	Rio Grande (RS)	17	Controle acionário pela Petrobras, Ultrapar e Braskem
Refinaria SSOil Energy	Coroados (SP)	12	Não há informação; Privada
Refinaria de Mangueiros (REFIT)	Rio de Janeiro (RJ)	10	Não há informação; Privada
Refinaria Lubrificantes do Nordeste (LUBNOR)	Fortaleza (CE)	10	Não há informação
Unidade de Industrialização do Xisto (SIX)	São Mateus do Sul (PR)	6	Não há informação; Privatizada
Univen Refinaria de Petróleo (UNIVEN)	Itupeva (SP)	5	Não há informação; privada
Dax Oil	Camaçari (BA)	2	Não há informação; privada

Fonte: Brasil, 2022b, p.12

Em virtude de todas as UGH estarem, atualmente, operando abaixo da capacidade máxima instalada, exige capacidade ociosa de cerca de 200 mil toneladas por ano de hidrogênio nas refinarias brasileiras.

Com o crescente interesse no hidrogênio como fonte energética, um dos desafios que se apresentam é a redução de seu custo de produção, que pode se dar através de ganhos de escala, de avanços tecnológicos em seus processos de produção, ou ainda, através da redução da utilização como insumo em alguns processos de refino (Brasil, 2022b, p. 10).

Rosana Cavalcante de Oliveira em seu estudo intitulado “Panorama do hidrogênio no Brasil”, publicado pelo Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), criou uma tabela ilustrando o potencial de hidrogênio no Brasil com os seguintes parâmetros:

Tabela 3. O potencial de hidrogênio no Brasil

ITENS ANALISADOS EM RELAÇÃO AO HIDROGÊNIO (H2)	BRASIL
Marco regulatório	Existe
Mercado interno e demanda	Existe
Grandes centros industriais para uso de H2	Existe
Infraestrutura para transporte	Em progresso
Excesso de energia verde para usar na eletrólise	Em progresso
Grande indústria de petróleo e gás para apoiar o hidrogênio azul	Existe
Habilidades da força de trabalho	Em progresso
H2 azul ou cinza em produção	Existe
H2 verde em produção	Existe
Apoio do governo	Existe

Fonte: Oliveira, 2002, p. 10-11

Embora, as maiores produções de hidrogênio sejam o cinza e o azul, e haja planta piloto de hidrogênio rosa, de acordo com Oliveira (2022, p. 16),

No Brasil, a região Nordeste está se posicionando como um polo produtor de H2V [hidrogênio verde], pois possui alto potencial para geração de energia eólica e solar e seus portos estão geograficamente bem localizados em relação aos principais mercados da Europa, além do Ceará — estado com o maior número de projetos de H2V anunciados no Brasil —, Rio Grande do Norte, Bahia, Pernambuco e Piauí também já possuem memoran-

dos de entendimento com a iniciativa privada para produção de H2V. O Brasil apresenta grande potencial de geração solar fotovoltaica com destaque para as regiões Nordeste e Centro-Oeste.

A partir desse diagnóstico, a EPE tem se dedicado a mapear parques eólicos e solares no Brasil com grande potencial de produção de hidrogênio verde. Abaixo, na figura 6, é ilustrado o *dashboard* de energia eólica onshore da EPE⁹.

Figura 6. Dashboard de Energia Eólica Onshore: base existente, evolução temporal e perspectivas

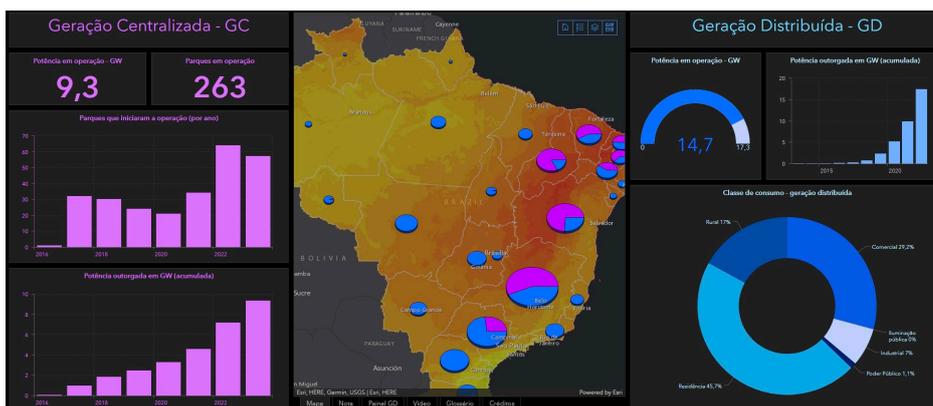


Fonte: EPE

De acordo com este *dashboard*, existem no Brasil 978 parques de geração de energia eólica *onshore* em território nacional com potência de 28 GW e 1.973 parques eólicos em fase de Despacho de Registro de Requerimento de Outorga (DRO), não iniciados ou em construção. A previsão da EPE é que, quando concluídos, os parques gerem potência de 81,3 GW. Embora as regiões nordeste e sul do Brasil liderem a geração de energia eólica, a maior parte destes parques está concentrada na região nordeste.

Abaixo, na figura 7, é ilustrado o *dashboard* de Energia Solar no Brasil da EPE¹⁰:

Figura 7. Dashboard de Energia Solar: geração centralizada e distribuída no Brasil



Fonte: EPE

Segundo este *dashboard*, existem 263 parques de energia solar em operação no Brasil com potência de 9,3GW. Diferente da geração de energia eólica, a geração de energia solar é mais distribuída geograficamente, com parques de geração de energia eólica existentes em todas as regiões brasileiras.

São a partir de parques de geração de energia eólica e solar, como estes ilustrados pela EPE, que o hidrogênio verde poderá ser produzido no Brasil. O Campus Integrado de Manufatura e Tecnologia (CIMATEC), em Salvador, na Bahia, a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), em Florianó-

9. Para conhecer melhor as informações contidas no dashboard da EPE, acesse [aqui](#).

10. Para conhecer melhor as informações contidas no dashboard da EPE, acesse [aqui](#).

polis, no estado de Santa Catarina, e o Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ), por exemplo, construíram plantas piloto de hidrogênio verde baseada em células fotovoltaicas ou fontes eólicas.

O CIMATEC criou um programa de pós-graduação *lato sensu* no seu Centro Universitário, em Salvador, para qualificar profissionais das áreas de engenharia e tecnologia em hidrogênio verde. A Federação das Indústrias do Estado da Bahia (FIEB) está mobilizando o setor empresarial baiano das áreas química, siderúrgica, produção de fertilizantes e petróleo para criar estratégias para reduzir o uso do carbono em processos industriais, a partir da produção do hidrogênio verde.

A planta piloto de hidrogênio verde da UFSC está localizada no Laboratório Fotovoltaico do Sapiens Parque, em Florianópolis e é gerada a partir de células fotovoltaicas. Esta planta piloto é fruto da Cooperação Brasil-Alemanha para o Desenvolvimento Sustentável no âmbito do projeto H2Brasil, cuja implementação foi realizada com a empresa alemã Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ, na sigla em alemão), em parceria com o MME, com o objetivo de apoiar a expansão do mercado de hidrogênio verde no Brasil. Também no âmbito do projeto H2Brasil, a COPPE/UFRJ inaugurou uma planta piloto de hidrogênio verde com nove eletrolisadores com membrana de troca aniônica com o objetivo de demonstrar a viabilidade técnica de equipamentos, como bicicletas elétricas movidas a hidrogênio, na micro mobilidade urbana ao longo da Cidade Universitária, no Rio de Janeiro.

Indo por outro caminho, a empresa Unigel está finalizando a construção de uma fábrica de hidrogênio verde no Polo Industrial de Camaçari, na Bahia. A empresa produz hidrogênio verde a partir da conversão em amônia para produzir combustível marítimo e fabricar fertilizantes e acrílicos com menores emissões de carbono.

Com relação ao hidrogênio rosa, a Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (CNAEA) sempre produziu hidrogênio rosa como um subproduto do hipoclorito de sódio; no entanto, este hidrogênio era diluído e descartado na atmosfera. É no processo de produção de hipoclorito de sódio pela eletrólise da água do mar que o hidrogênio rosa é gerado como subproduto. Devido ao hidrogênio ter ganhado valor comercial mundialmente enquanto combustível sustentável, a Eletronuclear (ETN) vislumbrou a possibilidade de aproveitar comercialmente este hidrogênio. A ETN tem buscado financiamento para estabelecer uma planta de beneficiamento na área de concentração e purificação do hidrogênio para aplicar, por exemplo, em células de combustível. No futuro próximo, o hidrogênio rosa produzido pela ETN poderá ser integrado no mercado nacional de geração de energia via cadeia produtiva nacional de hidrogênio.

Sendo assim, somando a capacidade produtiva de hidrogênio azul e hidrogênio cinza já instalada em refinarias brasileiras de óleo e gás com a capacidade produtiva de hidrogênio verde e hidrogênio rosa em processo de expansão nacional, comparados com os Vales de Hidrogênio na Europa, o Brasil reúne as condições necessárias para liderar a produção de hidrogênio no mundo.

Em junho de 2024, o Senado aprovou o projeto de lei da Câmara que estabelece o marco regulatório para a produção do hidrogênio de baixa emissão de carbono e determinou incentivos fiscais e financeiros para o setor. O projeto de lei 2.308/2023 propõe a criação da Política Nacional do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono, que compreende o Programa Nacional do Hidrogênio, o Programa de Desenvolvimento do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (PHBC), o Sistema Brasileiro de Certificação do Hidrogênio e o Regime Especial de Incentivos para a Produção de Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (REHIDRO). Este projeto de lei incentiva

a produção de hidrogênio de baixa emissão de carbono, inclusive o obtido a partir de fontes renováveis, como o produzido a partir de biomassas, etanol e outros biocombustíveis, e o hidrogênio eletrolítico, produzido por eletrólise da água, usando energias renováveis, tais como solar, eólica, hidráulica, biomassa, etanol, biogás, biometano, gases de aterro, geo-

“...somando a capacidade produtiva de hidrogênio azul e hidrogênio cinza já instalada em refinarias brasileiras de óleo e gás com a capacidade produtiva de hidrogênio verde e hidrogênio rosa em processo de expansão nacional, comparados com os Vales de Hidrogênio na Europa, o Brasil reúne as condições necessárias para liderar a produção de hidrogênio no mundo.”

térmica e outras a serem definidas pelo poder público (Agência Senado, 2024, p.2).

Cabe salientar que, por meio do marco regulatório, o governo acompanhará e estipulará metas e objetivos, e que os incentivos creditícios e tributários do REHIDRO terão vigência de cinco anos.

O REHIDRO suspenderá a incidência do PIS/Pasep e da COFINS, inclusive os de importação, sobre a compra de matérias-primas, produtos intermediários, embalagens, estoques e de materiais de construção feita pelos produtores de hidrogênio de baixa emissão de carbono habilitados (Agência Senado, 2024, p. 2).

“Sobre as vantagens do hidrogênio no setor de defesa, uma das principais é a densidade energética do hidrogênio, que é menor que a dos combustíveis fósseis utilizados no setor de transporte. Isso significa que o hidrogênio aumenta a autonomia dos meios de transporte marítimo, terrestre e aéreo, permitindo que percorram distâncias mais longas.”

É importante que o MME e o MD apoiem a Eletronuclear no *lobby* para que o hidrogênio rosa (oriundo de fonte nuclear) possa constar na lista de fontes energéticas incentivadas pelo novo marco regulatório proposto no projeto de lei. Uma futura planta industrial de produção de hidrogênio rosa pode aumentar a oferta de combustível sustentável, sobretudo, na região sudeste do País. O REHIDRO criará novos mercados e mais empregos na região à medida que, além da Eletronuclear, empresas da região que atuarem no transporte, distribuição, acondicionamento, armazenamento ou comercialização do hidrogênio rosa também poderão participar deste regime especial de incentivos.

Sobre as vantagens do hidrogênio no setor de defesa, uma das principais é a densidade energética do hidrogênio, que é menor que a dos combustíveis fósseis utilizados no setor de transporte. Isso significa que o hidrogênio aumenta a autonomia dos meios de transporte marítimo, terrestre e aéreo, permitindo que percorram distâncias mais longas. A título de exemplo,

o tanque Leopard 1 tem um motor V10 37 litros com 850 cv e peso de 42 toneladas, o que faz com que ele faça, em média, 400 metros por litro e autonomia de 450km. Já o tanque M60, que pesa 52 toneladas, ostenta um V12 de 29 litros e 750 cv, levando seu consumo médio a 300 metros por litro de diesel e autonomia de 500km (Ribeiro, 2021, p. 3).

O Leopard 1 é um modelo de carro de assalto alemão e o M60 é um carro de assalto estadunidense. Enquanto o modelo alemão tem capacidade para armazenar 1000 litros de diesel, o M60 armazena 1.400 litros de diesel. A menor densidade energética do hidrogênio o torna um potencial substituto do diesel em veículos militares, à medida que o hidrogênio permite que estes meios, em especial, os blindados, possam percorrer maiores distâncias sem necessidade de reabastecer. Em veículos militares terrestres, a eletricidade e o hidrogênio são as fontes com maior potencial de substituir a gasolina e o diesel, seja por meio de células a combustível, seja por meio de combustíveis sintéticos, mais conhecidos como *e-fuels*.

Atualmente diversas marinhas do mundo possuem em suas esquadras submarinos movidos por células a combustível de hidrogênio. Células a combustível geram eletricidade por meio de reação eletroquímica entre o hidrogênio e o oxigênio do ar. Comparativamente com submarinos diesel-elétricos, os submarinos movidos por células a combustível de hidrogênio de primeira geração já eram mais silenciosos, conseguiam permanecer por cinco vezes mais tempo submersos e suas bombas elétricas dissolviam poluentes, como enxofre, na água do mar para que não denunciasses sua posição.

Na década de 2010, os submarinos de célula a combustível de primeira geração já eram mais furtivos e aumentavam a capacidade de dissuasão das Marinhas, em comparação aos combustíveis fósseis. A empresa alemã ThyssenKrupp Marine Systems é a única fornecedora de acionamento de célula de combustível independente de ar externo (AIP, na sigla em inglês). Para tal gerador de energia adicional, o submarino precisa de oxigênio líquido e hidrogênio a bordo, os quais alimentam as células de combustível, responsáveis por produzir a eletricidade. Recentemente, a empresa lançou um sistema de célula de combustível de quarta geração para submarinos, o sistema FC4G. “As assinaturas gerais do FC4G são as mais favoráveis do mercado. Nenhum subproduto é descartado, as assinaturas térmicas e acústicas são reduzidas ao mínimo, enquanto a eficiência geral do sistema é duas vezes melhor que qualquer motor de combustão” (Galante, 2019, p. 3).

Mesmo tendo em tela o uso do hidrogênio em outros meios marítimos desde 2014, no caso dos Estados Unidos, ainda não foram encontradas evidências suficientes comprovando que células de combustível tenham resultado na melhoria de desempenho das belonaves.

Em 2014 a Marinha dos Estados Unidos da América (EUA), declarou como um dos seus grandes objetivos a utilização de navios que possibilitem a transformação da água do mar em hidrogênio, aumentando assim a sua autonomia e eliminando a logística necessária para reabastecimento (Harress, 2014 *apud* Santos, 2022, p. 18).

O emprego do hidrogênio como possível substituto de combustíveis fósseis no setor de defesa ainda apresenta significativos desafios tecnológicos e de mercado, desde a produção e o transporte, até o armazenamento e o consumo.

Todos os submarinos em operação da Marinha do Brasil são de origem inglesa do tipo IKL e utilizam sistema de propulsão diesel-elétrico. No âmbito da parceria estratégica França-Brasil, os quatro submarinos modelo Scorpène adquiridos também utilizam sistema de propulsão diesel-elétrico. O quinto submarino encomendado pelo governo brasileiro à empresa francesa Naval Group no âmbito desta parceria utilizará sistema de propulsão nuclear, cujo desenvolvimento do ciclo de combustível está sendo realizado pela própria Marinha do Brasil. Demais meios navais de superfície, como navios, carros de assalto e viaturas leves e blindadas da Marinha do Brasil utilizam motores movidos a diesel. Os helicópteros da Força Aeronaval brasileira voam com querosene de aviação.

“O emprego do hidrogênio como possível substituto de combustíveis fósseis no setor de defesa ainda apresenta significativos desafios tecnológicos e de mercado, desde a produção e o transporte, até o armazenamento e o consumo.”

Embora a FAB esteja acompanhando atenta a evolução dos estudos sobre hidrogênio como um dos combustíveis sustentáveis do futuro, seus meios aéreos em operação, como aviões de caça, aviões cargueiros e helicópteros, voam com querosene de aviação. Assim como nas demais Forças Armadas, nenhum meio terrestre do Exército Brasileiro em operação utiliza célula de hidrogênio como combustível.

4.2. Biocombustíveis

O cultivo de plantas para alimentos, fibras ou energia requer a utilização de milhares de litros de água por hectare. Embora, na atualidade, a importância da agricultura voltada para atender demandas do setor energético seja marginal se comparada com as demandas do setor de alimentos, em cenários futuros, a demanda de litros de água por hectare para a produção de biocombustíveis pode aumentar consideravelmente à medida que as oscilações no mercado de combustíveis fósseis, questões geopolíticas e as preocupações com os impactos das mudanças climáticas se intensificam. Estas questões geram preocupações por parte do setor público, já que a disputa por terras e recursos hídricos entre o setor de alimentos e o setor de biocombustíveis pode crescer, em especial, em áreas em que a água já é um recurso escasso.

Apesar de ser uma alternativa viável comercialmente aos combustíveis fósseis, a transformação de biomassa em biocombustíveis gera muita poluição química e/ou térmica a partir dos efluentes das refinarias e dos destinos de resíduos. Em função das regulamentações governamentais para a devolução de águas usadas serem cada vez mais restritivas, os custos industriais para o devido tratamento de resíduos são excessivamente altos.

No transporte marítimo, os biocombustíveis que estão em maior evidência são o Éster Metílico de Ácido Graxo (FAME, na sigla em inglês), biodiesel de base éster, e o óleo vegetal hidrotratado (HVO, na sigla em inglês). FAME são ésteres monoalquílicos de ácidos graxos de cadeia longa, derivados de óleos vegetais e gorduras animais, e podem ser produzidos com qualquer álcool (metanol, etanol, etc.). Os FAME B5 e B20 são os biodieseis mais comuns. O B5 possui até 5% de biodiesel e o B20 possui entre 6% a 20% de biodiesel, podendo ser empregados em muitas aplicações que utilizem diesel convencional a partir de pequenas ou nenhuma modificação nos motores, visto que motores que

operam com FAME B20 têm consumo de combustível, torque e potência similares aos motores que usam diesel de petróleo (Lopes, 2013).

Existe também o FAME B100, biodiesel puro usado como mistura para produzir outras misturas de menor porcentagem. Raramente, o B100 é utilizado como combustível para transporte. “Nos Estados Unidos, a mistura B20 é a mais utilizada pelo facto [sic] de proporcionar um bom equilíbrio entre o funcionamento a baixas temperaturas, o desempenho energético e os benefícios nas emissões e nos custos” (Lopes, 2013, p. 3).

É importante enfatizar que o FAME não é um combustível hidrocarboneto como o diesel de petróleo e, portanto, difere do diesel de petróleo em vários aspectos importantes. Primeiro, o biodiesel FAME contém oxigênio, o que faz com que o FAME tenha aproximadamente sete por cento menos energia por volume. Em segundo lugar, o maior teor de oxigênio do FAME pode limitar o período de tempo em que ele pode ser armazenado devido à oxidação que causa corrosão. Terceiro, a composição química do FAME pode torná-lo mais suscetível à incrustação microbiana quando há má gestão dos tanques de armazenamento, o que pode resultar na corrosão dos tanques de armazenamento e no entupimento das linhas de combustível. Quarto, o biodiesel FAME tem uma temperatura relativamente alta onde começará a congelar e formar cristais visíveis. Isto é conhecido em termos técnicos como ponto de turvação do combustível. Por exemplo, o ponto de turvação para o biodiesel FAME feito de óleo de soja é de aproximadamente 34 graus Fahrenheit em comparação com cerca de 16 graus Fahrenheit para o diesel de petróleo. Se o processo de congelamento continuar, o combustível acabará por solidificar completamente, uma condição conhecida como “gelificação”. Uma vez que ocorre a gelificação, o combustível solidificado não fluirá através das linhas de combustível. Por estas razões, o biodiesel FAME é misturado ao diesel de petróleo para consumo final. As misturas comuns incluem B5 (até 5% de biodiesel) e B20 (6 a 20% de biodiesel) (Gerverni e Irwin, 2023, p. 2).

De acordo com o Departamento de Energia dos EUA, “frotas regulamentadas que utilizam misturas de biodiesel de 20% ou mais se qualificam para créditos de uso de combustível biodiesel de acordo com a Lei de Política Energética de 1992”.

Muitos investigadores têm tentado determinar a melhor composição de biodiesel para poder melhorar o seu processo de combustão. Tem sido observado que as propriedades do biodiesel desempenham um papel significativo nesse processo de combustão. Uma dessas propriedades é o número de Cetano. O número de Cetano é um indicador comum para determinar a qualidade do combustível, especialmente a qualidade da ignição. A qualidade de ignição é determinada pela estrutura dos ésteres que compõem o biodiesel (Lopes, 2013, p. 6).

Neste sentido, a fim de avaliar a qualidade do FAME, é imprescindível conhecer a constituição dos ésteres que o compõem, os quais estão listados na tabela 4 abaixo:

Tabela 4. Estrutura química e nomenclatura de alguns FAME constituintes do biodiesel

FAME	ESTRUTURA
Laurato de metilo	C12:0
Miristato de metilo	C14:0
Palmitato de metilo	C16:0
Palmitoleato de metilo	C16:1
Estearato de metilo	C18:0
Oleato de metilo	C18:1
Linoleato de metilo	C18:2
Linolenato de metilo	C18:3
Araquidato de metilo	C20:0
Eicosanóico de metilo	C20:1
Behenato de metilo	C22:0
Erocatato de metilo	C22:1

Fonte: Lopes, 2013, p. 7

No Brasil, em março de 2023, o CNPE aprovou resolução que estabelece mistura obrigatória de 12% de biodiesel no diesel fóssil a partir do mês de abril de 2023, e o aumento progressivo para 15% de mistura até o ano de 2026. Até então, o percentual de mistura era de 10%. Embora esta resolução esteja recebendo bastante críticas tanto de setores verdes quanto de setores pró-combustíveis fósseis, de acordo com o MME, o estudo técnico para aumentar para 12% a mistura de biodiesel considerou o impacto econômico no consumidor, já que este aumento na mistura prevê aumento de apenas dois centavos no preço do biodiesel na bomba dos postos de abastecimento.

Enquanto a indústria do biodiesel e os ambientalistas aguardavam maior percentual de mistura de biodiesel do que os 12% anunciados, setores contrários ao biodiesel alegam falta de qualidade em misturas acima de 10%, porque provocariam problemas mecânicos em veículos (EBC, 2023). O Departamento de Estado do EUA, de fato, alerta que,

ao usar misturas de alto nível, vários fatores devem ser considerados. O biodiesel puro contém menos energia volumétrica do que o diesel de petróleo. Portanto, quanto maior o percentual de biodiesel (acima de 20%), menor será o conteúdo energético por galão. Misturas de biodiesel de alto nível também podem afetar as garantias do motor, gelar em temperaturas frias e podem apresentar problemas únicos de armazenamento. O uso de B100 também poderia aumentar as emissões de óxido de nitrogênio, embora reduza bastante outras emissões tóxicas.

Estudo da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA, na sigla em inglês) demonstrou que uma mistura do tipo B20 (20% de biodiesel) conduz ao aumento das emissões de NOx em cerca de 2% em relação ao diesel proveniente do petróleo. Uma análise detalhada dos dados produzidos pela EPA, conduziu a resultados, recentes, que mostram um impacto positivo da mistura B20 nas emissões de HC e CO. No entanto, as emissões de NOx são também grandemente dependentes do design do motor (Lopes, 2013).

Logo, o FAME B100 pode exigir modificações nos motores dos veículos, além de ter que atender requisitos da Sociedade Americana de Testes e Materiais (ASTM, na sigla em inglês). Por exemplo, o B100 para uso em mistura com combustíveis destilados médios deve atender à norma D6751 da ASTM, a qual foi aprovada em agosto de 2020.

Retornando ao caso brasileiro, a indústria do biodiesel alega que já possui capacidade instalada para produzir o B20. De acordo com levantamento realizado por três principais associações da indústria do biodiesel, entre elas a Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais (ABIOVE), a Associação dos Produtores de Biocombustíveis do Brasil (APROBIO) e a União Brasileira do Biodiesel e Bioquerosene (UBRABIO), o mercado demandaria 13,2 milhões de metros cúbicos de B100 caso a mistura fosse elevada em oito pontos percentuais chegando aos 20% mencionados, representando, por sua vez, 90% da capacidade das 60 usinas de biodiesel autorizadas pela ANP (BiodieselBr, 2024). “Além da capacidade atual, há 8 novas usinas em construção e 10 usinas em processo de expansão. Isso agregaria, respectivamente, 916 mil m³ e 685 mil m³ ao parque fabril nacional” (BiodieselBr, 2024, p. 1).

Em 2023, o parque industrial brasileiro produziu 7,52 milhões de metros cúbicos de biodiesel. Neste ano de 2024, o parque industrial brasileiro tem capacidade instalada para produzir quase 14,6 milhões de metros cúbicos. Com o incremento das oito novas usinas em construção e das 10 usinas em processo de expansão, a capacidade instalada no Brasil elevaria a produção para 16,2 milhões de metros cúbicos de biodiesel.

Apesar desta elevação na capacidade produtiva, um dos maiores desafios que o setor de biodiesel tende a enfrentar no futuro para produzir FAME B20 é a concorrência que sofrerá com o setor de alimentos. As projeções da ABIOVE estimam que, em 2024, apenas cinco milhões dos 10,9 milhões de toneladas de óleo de soja terão como destino a produção de biodiesel. “No caso de B20, a demanda pelo óleo de soja está estimada em 8,7 milhões de toneladas” (BiodieselBr, 2024, p.2). O aumento da mistura de 20% do biodiesel ao diesel de petróleo provavelmente impactará no setor de alimentos. O setor de reciclagem animal também tende a sofrer impacto com o B20 à medida que, de acordo com Pedro Bittar, Presidente do Conselho Diretivo da Associação Brasileira de Reciclagem Animal (ABRA), “o au-

“Apesar desta elevação na capacidade produtiva, um dos maiores desafios que o setor de biodiesel tende a enfrentar no futuro para produzir FAME B20 é a concorrência que sofrerá com o setor de alimentos.”

mento estimado em 2,6 bilhões de litros de biodiesel, mantidas as proporções atuais, implicaria em um aumento de 400 mil litros de gorduras animais consumidos, volume facilmente absorvível frente aos 2,5 bilhões de litros produzidos anualmente (BiodieselBr, 2024, p. 3).

Outro receio é que os biodieseis percam reserva de mercado em relação à ascensão no mercado de diesel verde. A produção do HVO, também conhecido como diesel verde ou diesel renovável, demanda insumos fósseis, como o gás hidrogênio derivado do gás natural. O HVO é produzido por meio de coprocessamento de derivados de petróleo com insumos de origem vegetal, como óleo de soja. Nos EUA, o processo mais comum é conhecido como hidroprocessamento. Usinas de produção de diesel fóssil são facilmente convertidas em usinas de produção de HVO e vice-versa. Importante esclarecer que, se as condições econômicas exigirem, o potencial para alternar entre o petróleo bruto e a refinação de gorduras e óleos orgânicos é cabível para todas as tecnologias.

Embora não seja idêntico ao diesel de petróleo, o diesel renovável está tão próximo do que é considerado um substituto imediato do diesel de petróleo. Por outras palavras, o diesel renovável não precisa ser misturado com diesel de petróleo para ser utilizado como combustível “específico” em motores diesel modernos. A natureza *drop-in* do diesel renovável é uma vantagem significativa em relação ao biodiesel FAME. O diesel renovável tem um conteúdo energético um pouco menor em comparação com o diesel de petróleo (quatro por cento menos em volume), mas isso pode ser compensado por outras propriedades desejáveis do diesel renovável (Brown, 2020 *apud* Gerweni e Irwin, 2023, p. 3).

Da mesma forma que se mistura FAME com diesel de petróleo, também se mistura HVO com diesel de petróleo. O R5 é 5% de HVO com 95% de diesel de petróleo. Assim como o B20 e outros FAME inferiores aos 20%, também não há necessidade de modificações nos veículos para o diesel verde. No entanto, os custos de capital são substancialmente mais elevados para a produção de HVO em comparação com a produção FAME, dada a maior quantidade de matéria prima necessária, chegando aproximadamente a 8 libras de matéria prima para se produzir 1 galão de diesel renovável (Xu et. al., 2022 *apud* Gerweni e Irwin, 2023, p. 3).

A estimativa de taxa de retorno esperada ainda não é favorável ao consumidor à medida que, atualmente, o HVO pode aumentar o consumo de combustível dos veículos, em comparação com combustíveis fósseis. Se comparado à mistura de 95% de diesel fóssil e 5% de biodiesel, o consumo de HVO puro pode ser de 0,8% a 3,5% maior em volume. Apesar de a produção de HVO puro ou misturado ao diesel fóssil em altas proporções poder utilizar a infraestrutura de refinarias de petróleo já existentes, para ser formado, este diesel verde deve entrar em contato com hidrogênio sob alta pressão, o que envolve riscos na sua produção (Lopes, 2013).

A Petrobras já comercializa diesel verde em território nacional, sobretudo, R5 e R10. O HVO pode ser produzido com 5% de conteúdo renovável (R5) e com 10% de conteúdo renovável (R10). Estima-se que o HVO R, em comparação com os FAME, apresenta melhor desempenho nos motores, minimiza danos como entupimento de filtros, bombas e bicos, e aumenta a vida útil dos veículos. O R5 já é comercializado pela Petrobras por meio da Refinaria Presidente Getúlio Vargas, no Paraná, e a comercialização do R5 no estado de São Paulo será realizada pela Refinaria Presidente Bernardes. A produção e a comercialização do HVO R conferiram à Refinaria Presidente Getúlio Vargas a Certificação Internacional de Sustentabilidade e Carbono (ISCC, na sigla em inglês), uma das mais tradicionais certificações no mercado de sustentabilidade de matérias-primas e produtos.

Em termos de transporte, a Petrobras, por meio do Programa BioRefino 2030, pretende fomentar e financiar projetos de combustíveis sustentáveis para transporte nacional marítimo, aéreo e terrestre. A empresa brasileira Vale também tem interesse em fomentar tais iniciativas. Em setembro de 2023, Petrobras e Vale selaram um protocolo de intenções a fim de avaliarem oportunidades conjuntas de descarbonização e a possibilidade de estabelecer novos acordos para o fornecimento de combustíveis sustentáveis para navios operados pela Vale. No transporte aéreo, os SAF são os que têm

“Em termos de transporte, a Petrobras, por meio do Programa BioRefino 2030, pretende fomentar e financiar projetos de combustíveis sustentáveis para transporte nacional marítimo, aéreo e terrestre. A empresa brasileira Vale também tem interesse em fomentar tais iniciativas.”

o maior potencial para substituir o querosene de aviação (QAV), derivado de combustíveis fósseis. O SAF também é conhecido como Biojet ou BioQAV (querosene verde).

O combustível de aviação sustentável consiste nos hidrocarbonetos derivados de matérias-primas renováveis, obtidos por meio de rotas regulamentadas e que podem compor misturas com o querosene derivado do petróleo para uso em turbinas de aeronaves, atendendo a especificações previstas em normas, como a ASTM D7566 (Bento, 2022, p. 21).

Dentre as rotas tecnológicas mais conhecidas de SAF, é possível destacar o querosene parafínico sintetizado por Fischer-Tropsch (FT-SPK), o querosene parafínico sintetizado por hidroprocessamento de ésteres e ácidos graxos (HEFA, na sigla em inglês), os açúcares fermentados hidroprocessados para isoparafinas sintéticas (HFS-SIP, na sigla em inglês), o álcool para querosene parafínico sintético (ATJ-SPK, na sigla em inglês), a hidrotermólise catalítica querosene sintetizado (CH-SK, na sigla em inglês) e os hidrocarbonetos hidroprocessados, ésteres e ácidos graxos querosene parafínicosintético (HHC-SPK ou HC-HEFA-SPK, nas siglas em inglês).

O HEFA é considerado a principal rota tecnológica capaz de fornecer SAF em escala comercial para a aviação, à medida “que necessita de menores custos e investimentos do que outras rotas de obtenção de querosene alternativo” (Roitman, 2018 *apud* Pereira, 2021, p.20). Os SAF são *drop-in*, ou seja, são combustíveis idênticos ao querosene fóssil na molécula, porém, oriundos de biomassas, resíduos, hidrogênio ou CO₂. O SAF emite até 80% menos carbono na atmosfera em comparação aos combustíveis fósseis. Outra vantagem de o SAF ser *drop-in* no transporte aéreo é que os fabricantes de aviões não precisam redesenhar motores ou aeronaves e os fornecedores de combustível e aeroportos não precisam construir novos sistemas de entrega de combustível. Diferentemente do que ocorreria se as fontes energéticas de baixo carbono fossem baseadas, por exemplo, em hidrogênio ou em eletrificação.

Em julho de 2022, a Raízen assinou uma carta de intenções com a Embraer a fim de estimular o desenvolvimento de um ecossistema de produção de SAF no Brasil e facilitar a troca de conhecimento em SAF entre as duas empresas e seus *stakeholders*. A empresa Raízen é uma *joint venture* constituída pela Shell e pela Cosan. Esta *joint venture* é especialista na produção de cana de açúcar, etanol e bioenergia. Em junho de 2023, a Embraer e a Pratt & Whitney realizaram teste bem-sucedido com motores GTF na aeronave E195-E2 utilizando 100% de HEFA-SPK, SAF adquirido da empresa World Energy. A Embraer não é fabricante de SAF, mas é a única empresa de aviação brasileira que já está realizando testes nos motores de seus jatos comerciais com SAF.

Finalmente, para o transporte terrestre, “existem atualmente diversas alternativas de energia, com destaque para a eletricidade, o biogás, o biodiesel e o bioetanol” (Prauchner *et al.*, 2023, p. 2). Na atual conjuntura, a eficiência energética média dos biocombustíveis brasileiros na maior parte dos meios de transporte terrestre ainda é inferior à eficiência energética da gasolina. Além disso, ainda em comparação com a gasolina, o biodiesel apresenta maior custo de produção, demanda grandes áreas para cultivar grãos oleaginosos e a produção do biodiesel gera grande quantidade de resíduos. Apesar da considerável capacidade produtiva brasileira, enquanto estes gargalos na cadeia produtiva não forem superados, menores são as chances de o biodiesel efetivamente substituir a gasolina no transporte terrestre.

Embora a Marinha do Brasil esteja acompanhando atentamente os estudos científicos, testes e ensaios realizados por empresas e marinhas de outros países, e os relatórios técnicos do MME sobre biobunkers, até a data presente, nenhum meio naval de superfície ou submarino da Marinha do Brasil navegou fazendo uso de biocombustível. Embora a EMBRAER esteja envolvida no desenvolvimento de SAF, até o presente momento, nenhum meio aéreo da FAB voou fazendo uso de biocombustível. Semelhante à Marinha e à FAB, nenhum meio militar em operação da Força Terrestre utiliza biocombustível. No entanto, o Exército Brasileiro vem acompanhando atentamente a evolução dos

“O SAF emite até 80% menos carbono na atmosfera em comparação aos combustíveis fósseis. Outra vantagem de o SAF ser *drop-in* no transporte aéreo é que os fabricantes de aviões não precisam redesenhar motores ou aeronaves e os fornecedores de combustível e aeroportos não precisam construir novos sistemas de entrega de combustível.”

estudos científicos e os relatórios técnicos elaborados pelo MME sobre o emprego dos novos tipos de biocombustíveis em veículos terrestres.

4.3. Baterias elétricas

Sistemas de acumulação ou de armazenamento de energia, como baterias elétricas, têm despontado nas tendências globais. Baterias são acumuladores de energia elétrica que fornecem energia diante da falta de energia primária, em casos de picos de consumo ou em caso de falha no sistema de retificação. Baterias elétricas apresentam condições de substituir a gasolina em transportes terrestres que requerem alta eficiência energética, como os militares. Dentre as baterias elétricas que mais têm despontado no mercado de veículos terrestres, encontram-se baterias de fluxo, baterias de lítio-ar, baterias de íons-lítio (BIL, na sigla em inglês), dentre outras.

“Baterias elétricas apresentam condições de substituir a gasolina em transportes terrestres que requerem alta eficiência energética, como os militares.”

Estudos científicos apontam que as baterias de lítio-ar apresentam densidade energética equivalente à densidade energética de combustíveis fósseis. No entanto, devido a problemas relacionados à baixa vazão do oxigênio, à corrosão metálica e à potência limitada, acredita-se que as baterias de lítio-ar ainda estão longe de estar disponíveis comercialmente no mercado (Corrêa, 2021a).

Se adaptarmos as tecnologias em contínuos processos de aperfeiçoamento, como as baterias substituíveis de íons-lítio e/ou células de combustível em tecnologias militares alimentadas por fontes elétricas na guerra do futuro, poderá haver um impacto significativo na formulação de novas estratégias, na tática, na logística e no planejamento das operações nos teatros militares (Corrêa, 2021a, p. 5).

Em função de seu emprego em veículos elétricos, baterias de íons-lítio não são mais consideradas inovação. Entretanto, seu novo uso para fornecer energia a *datacenters*, estendendo a sustentabilidade também para o ramo da tecnologia digital, é considerado inovador, e faz eco ao novo conceito de “TI Sustentável” ou “TI Verde”. Outro ponto se refere à versatilidade, pois existem diversos usos para baterias de íons-lítio, tais como exemplificados na figura 8 abaixo.

Figura 8. Aplicações da bateria de lítio



Fonte: Da Silva, 2021, p.2

Cumprе ressaltar, no entanto, que cada um destes meios exige um tipo de bateria de íon-lítio diferente. As BIL utilizadas em *datacenters* costumam ser as mesmas utilizadas em veículos elétricos e são constituídas com óxido de íon-lítio-manganês (LMO, na sigla em inglês) ou óxido de lítio-níquel-manganês-cobalto (NMC, na sigla em inglês). Estas baterias têm substituído baterias padrão de chumbo-ácido reguladas por válvula (VRLA, na sigla em inglês) em *datacenters*, as quais antes consistiam na principal fonte de energia backup de curta duração.

Ainda sobre os *datacenters*, diante do aumento considerável do uso de energia demandado pela Internet das Coisas (IoT), ciência de dados, e-commerce e nuvens, a tendência é aumentar cada vez mais o uso de sistemas de armazenamento de energia a fim de reduzir os custos destas centrais. Comparando os benefícios de se substituir baterias VRLA por BIL, pode-se afirmar que as BIL ocupam menos espaço para ter a mesma potência que as VRLA, apresentam maior durabilidade, são menos

pesadas, recarregam mais rápido, podem operar em temperaturas mais altas e apresentam menores custos de refrigeração. O custo inicial para a aquisição de baterias de íons-lítio, geralmente, é cerca de 1,5 a 2 vezes maior do que para adquirir uma VRLA; no entanto, por conta de as BIL apresentarem menores custos de manutenção, geram maior economia em custos operacionais. Porém, há desafios a serem superados no que se refere ao emprego destas, sendo o primeiro, “a utilização de metais raros ou caros e o impacto ambiental da sua extração; e em segundo lugar — relacionado com isto — a atual falta de reciclagem” (Lawrence, 2020, p. 1).

De acordo com o Serviço Geológico do Brasil (SGB), as maiores reservas mundiais de lítio estão concentradas, respectivamente, no Chile (46,6%), na Austrália (28,9%) e na Argentina (11,2%). Economicamente viável, o Brasil é a 7ª maior reserva mundial de lítio. As maiores reservas nacionais de lítio estão localizadas nas cidades mineiras dos vales do Jequitinhonha e do Mucuri, em Minas Gerais. Os minérios de lítio viáveis economicamente estão enquadrados em três categorias: (1) minérios com origem em rochas principalmente graníticas, constituídas, essencialmente, por quartzo, feldspato potássico, plagioclásio e micas, cujos atributos texturais podem ser o suficiente para definir um corpo pegmatítico (pegmatitos); (2) minérios originados em salmouras evaporíticas continentais¹¹ e (3) minérios originados de argilas hectoritas, e outros minerais de oriundos de argilas menos comuns, como a jadarita.

Os pegmatitos contêm diversos tipos de minerais de lítio, tais como: lepidolita, ambligonita, petalita, trifilita, espodumênio e montebrasita. A petalita e o espodumênio são os minérios de lítio mais relevantes na atual cadeia de beneficiamento e os mais utilizados nas baterias elétricas. Este minério é considerado material crítico para o desenvolvimento da indústria verde.

De acordo com dados do MME, “ao contrário da maioria dos outros países, o lítio encontrado em Minas Gerais é de alta pureza, facilitando seu uso na fabricação de baterias mais potentes” (Brasil, 2023d, p. 2). Embora o processamento desses minerais críticos para aplicação em baterias de íons-lítio seja incipiente, as poucas reservas de lítio brasileiro do tipo pegmatitos são de alta qualidade. Em julho de 2023, sob impulso especialmente da indústria automotiva, o Brasil exportou a primeira remessa de lítio verde, oriundo do Vale do Jequitinhonha, para a China. A mineradora responsável por esta operação é a empresa canadense com fábrica no Brasil denominada Sigma Lithium, cujas ações têm sido disputadas no mercado por diversas empresas automobilísticas, como a alemã Volkswagen, a chinesa BYD e a estadunidense Tesla. A Sigma Lithium liderou o *ranking* internacional Venture 50 da Bolsa de Toronto de 2023.

Outras empresas estrangeiras se interessam pela produção de íons-lítio brasileiro, como a BYD, e estão se instalando no país. Existem também projetos nacionais inovadores acerca da produção destas baterias. A título de exemplo, há um projeto de baterias de íons-lítio com Nível de Maturidade Tecnológica 7 (TRL, na sigla em inglês) financiado pela Empresa Brasileira de Pesquisa e Inovação Industrial (EMBRAPII) no âmbito do programa Rota 2030, em desenvolvimento por meio de parceria estabelecida entre a Fiat Chrysler Automobiles, o Instituto SENAI de Inovação (ISI) em Eletroquímica do Paraná e o Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações (CPQD). Além disso, o ISI coordena um Grupo de Trabalho para criar um centro de competências para desenvolver a cadeia de valor para a produção de insumos e matéria-prima nacional a fim de fabricar baterias de íons-lítio.

Diversas outras tecnologias promissoras no setor de acumuladores de energia apresentam potencial interesse da Defesa, tais como baterias de fluxo, baterias de lítio-ar, células de combustível, íons de lítios, entre outras. Estas apresentam o potencial de sanar algumas vulnerabilidades logísticas trazidas pela dependência de combustíveis fósseis, constituindo-se em uma das tecnologias emergentes com emprego esperado na guerra do futuro, a exemplo da discussão presente no artigo “Projeções sobre o Futuro da Guerra: Tecnologias disruptivas e mudanças paradigmáticas (2020-2060)”

“Embora o processamento desses minerais críticos para aplicação em baterias de íons-lítio seja incipiente, as poucas reservas de lítio brasileiro do tipo pegmatitos são de alta qualidade. Em julho de 2023, sob impulso especialmente da indústria automotiva, o Brasil exportou a primeira remessa de lítio verde, oriundo do Vale do Jequitinhonha, para a China. A mineradora responsável por esta operação é a empresa canadense com fábrica no Brasil denominada Sigma Lithium.”

11. Além de salmouras hidromórficas e geotermiais — estes últimos menos expressivos.

de Daniel Barreiros (2019). Outro ponto a se destacar nesta discussão é a dispendiosa logística para a operação de plataformas de armas fóssil-dependentes, que envolve transporte, defesa, perdas, etc, o que significa um custo de cinco a 50 vezes maior que os custos de mercado para cada galão de combustível distribuído a navios em alto mar, por exemplo.

Barreiros acredita que a aposta em fontes de alimentação elétrica geradas por processos renováveis e de alta mobilidade na guerra do futuro vai se tornar cada vez mais alta à medida que as Forças Armadas têm empregado cada vez mais tecnologias e sistemas eletrônicos em operações nos teatros militares desde rádios de comunicações, VANTs, transmissores de localização de emergência, termovisores, sistemas GPS até mísseis, designadores laser, sensores químico-biológicos e exoesqueletos (Corrêa, 2021a, p. 5).

“Diversas outras tecnologias promissoras no setor de acumuladores de energia apresentam potencial interesse da Defesa, tais como baterias de fluxo, baterias de lítio-ar, células de combustível, íons de lítios, entre outras. Estas apresentam o potencial de sanar algumas vulnerabilidades logísticas trazidas pela dependência de combustíveis fósseis, constituindo-se em uma das tecnologias emergentes com emprego esperado na guerra do futuro.”

Apesar de empregarem modernas baterias elétricas que alimentam de energia seus sistemas eletrônicos, cumpre ressaltar que os veículos militares blindados do Exército dos EUA ainda usam combustíveis fósseis (Corrêa, 2021a). Isso pode colocar em questão a transição energética destes meios e sua eficiência operacional caso se opte apenas pelo emprego das baterias como fonte de energia. No entanto, o surgimento constante de inúmeras surpresas estratégicas na área de acumuladores de energia e de energias renováveis por parte de potenciais inimigos torna a dependência de combustíveis fósseis ainda mais preocupante para as autoridades estadunidenses, mantendo a necessidade de transição energética em tela.

Modernos submarinos diesel-elétricos em geral, por exemplo, costumam usar conjuntos de baterias de chumbo-ácido que alimentam o motor elétrico do sistema de propulsão. Embora sejam bastante confiáveis pelos anos acumulados de utilização em submarinos, “são caras de manter e demandam grandes cuidados durante a operação, pois podem gerar gases venenosos e hidrogênio gasoso, altamente inflamável” (Vogt, 2018, p.111).

Este tipo de bateria [chumbo-ácido] também é largamente empregado há anos em torpedos, AUVs, UUVs e ROVs em missões militares como guerra de contraminagem, coleta de inteligência e destruição furtiva de alvos, mas também em missões hidrográficas e inspeção de plataformas *offshore* ou paredes e canais de barragens, eclusas e grandes reservatórios de água em geral (Vogt, 2018, p. 112).

Os submarinos modelo Scorpène que estão sendo entregues à Marinha do Brasil no âmbito da parceria estratégica França-Brasil utilizam um conjunto de bateria de chumbo-ácido com 360 elementos de baterias, em que cada bateria mede 1,20m, e alimenta o motor elétrico do sistema de propulsão e todos os demais sistemas internos. A cada três horas e meia em velocidade máxima, é preciso acionar o motor a diesel para recarregá-las e manter o funcionamento do motor do submarino.

Como mencionado, a inovação das baterias de lítio-ar está nas novas aplicações e, atualmente, diversas empresas estrangeiras têm desenvolvido sistemas de bateria lítio-ar para alimentar o sistema de propulsão diesel-elétrico de seus submarinos, em especial, os de AIP. Em comparação com as baterias de chumbo-ácido, as baterias de lítio-ar empregadas em submarinos do tipo AIP possuem custos de serviços de manutenção bem baratos, não sofrem de efeito memória, podem operar em temperatura ambiente entre zero e dez graus celsius, recarregam em menos tempo, podem ser recarregadas a partir de qualquer estado de carga (SOC, na sigla em inglês) acima de 5% para qualquer outro nível de SOC desejado e possuem maior durabilidade. Embora nenhum meio naval da Marinha do Brasil esteja operando com baterias lítio-ar, é importante que esta Força Naval esteja atenta às evoluções tecnológicas em baterias elétricas que marinhas mundiais, como a do Japão, têm empregado em seus submarinos. A empresa alemã Thyssenkrupp Marine Systems (TKMS) e a empresa francesa SAFT também estão, conjuntamente, investindo em novos projetos de sistemas de baterias de íons de lítios para submarinos.

Sob gerência da Agência Espacial Brasileira (AEB) e com financiamento da Equatorial Energia, como parte do programa de P&D da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), foi implantada a Microrrede de Energia Elétrica Inteligente com a finalidade de aumentar a confiabilidade e a disponibilidade da energia elétrica na cidade de Alcântara, no estado do Maranhão, em especial do Centro de Lançamento de Alcântara (CLA), por meio da instalação de um sistema fotovoltaico (Usina PV) e um sistema de armazenamento de energia a baterias (BESS, na sigla em inglês). O projeto foi concebido e implementado por pesquisadores do Instituto de Energia Elétrica (IEE) da Universidade Federal do Maranhão (UFMA), em parceria com a empresa Enova Energia Solar. Com início em 2020, o projeto durou 30 meses e teve investimento de aproximadamente 18 milhões de reais, sendo inaugurado no dia 16 de junho de 2023 no Espaçoporto de Alcântara.

Em função de a falta de energia comprometer a segurança das operações dos lançamentos espaciais, o CLA é considerado infraestrutura crítica. Segundo Luiz Antonio de Souza Ribeiro, coordenador do projeto pelo IEE/UFMA, o CLA “é um dos melhores locais para o lançamento de foguetes, tendo em vista que fica próximo à linha do equador. Considerando os requisitos de confiabilidade necessários, para que um lançamento seja bem-sucedido, é fundamental que os índices de qualidade de energia sejam muito bons” (UFMA, 2023, p.1). Luiz Antonio de Souza Ribeiro acrescentou que “o projeto atende a demandas econômicas e ambientais. Portanto a expectativa é que seja gerada uma economia de energia de 35% para o Centro de Lançamento de Alcântara” (UFMA, 2023, p.1). A fim de garantir a segurança do fornecimento de energia e a segurança cibernética nas operações de lançamento, a Microrrede Inteligente funciona no modo off-grid, ou seja, desconectada da rede elétrica convencional local.

O abastecimento de energia é garantido, principalmente, pelo banco de baterias e pela energia solar fotovoltaica renovável. Caso o banco de baterias se esgote, o sistema de gerenciamento de energia entra em ação, ajustando as cargas não prioritárias e acionando a fonte de backup. Dessa forma, o sistema de gerenciamento garante o equilíbrio de potência necessário, adaptando a geração de energia às variações do consumo (UFMA, 2023, p.2).

A Microrrede Inteligente volta a ser conectada à rede de energia elétrica convencional local, ou seja, no modo on-grid, quando não há operações de lançamento no CLA. O sistema fotovoltaico desta Microrrede Inteligente é constituído por 2.832 painéis solares, com capacidade para gerar 1.823 MWh de energia por ano. O sistema BESS desta Microrrede foi fornecido pela empresa WEG S.A. e utiliza módulo de baterias de íons-lítio Utility Scale embarcada em containers, com potência instalada de 1MW e 1MWh de capacidade de armazenamento.

Em parceria com a Usina Hidrelétrica de Itaipu, o Exército Brasileiro implantou um sistema de geração fotovoltaico que gera 180 kWp com 63 módulos na Amazônia. Este sistema de geração fotovoltaico é alimentado por um sistema de armazenamento de energia que conta com doze baterias de íons de sódio. O projeto foi desenvolvido pela Usina Hidrelétrica de Itaipu, em 2014, com o objetivo de garantir segurança energética para comunidades isoladas do País, que não são atendidas pelo Sistema Interligado Nacional. Conforme citado anteriormente, em 2016, o Exército instalou uma unidade de demonstração em seu Quartel General, em Brasília. Na sequência, o Exército instalou unidade geradora de energia fotovoltaica semelhante no Pelotão Especial de Fronteira, em Tunuí-Cachoeira, na cidade de São Gabriel Cachoeira, no Amazonas. Por ter funcionado por poucos meses, a unidade de geração de energia apresentou falhas técnicas. A equipe técnica do Exército ajudou a equipe técnica da Usina Hidrelétrica de Itaipu a corrigir as falhas operacionais e religaram, em 2020, o abastecimento de energia local na região remota da Amazônia (Arandanet, 2020).

Durante o dia, a energia gerada no painel fotovoltaico abastece de energia a rede local e o excedente de energia carrega a bateria de íons de sódio. Durante a noite, a bateria de íons de sódio abastece de energia a rede local¹². Daí o sistema de geração e armazenamento de energia ser híbrido bidirecional. Além de reduzir suas despesas com eletricidade, o Exército Brasileiro colabora com maior sustentabilidade na região amazônica. A Força Terrestre tem instalado outros módulos de geração de energia fotovoltaica em demais regiões militares do País, como no 5º Pelotão Especial de Fronteira (5º PEF), em Maturacá, no estado do Amazonas; no 6º Batalhão de Engenharia de Construção (Batalhão Simón

12. Um gerador de energia a diesel é mantido como backup do gerador de energia que utiliza bateria elétrica.

Bolívar), em Auaris, no estado de Roraima; no 7º Batalhão de Engenharia de Combate, em Natal, no estado do Rio Grande do Norte; e no 1º Grupamento de Engenharia, em João Pessoa, no estado da Paraíba. Ainda não existe nenhuma unidade militar do Exército Brasileiro fazendo uso de sistemas de baterias de íons de lítio.

4.4. Reatores nucleares

A energia nuclear é considerada uma fonte energética de baixo carbono e, portanto, também é um combustível sustentável. Reatores nucleares são comprovadamente capazes de garantir aumento da eficiência energética em bases militares; no entanto, pequenos reatores modulares e microrreatores nucleares ainda estão em fase de implementação em sistemas militares. O ganho de eficiência energética dos submarinos com propulsão nuclear, por exemplo, em comparação com os submarinos movidos a diesel-elétrico ou sistemas de propulsão de ar independente, aumenta comprovadamente a autonomia, a velocidade, a mobilidade, a furtividade, entre outras capacidades de defesa. De fato, a guerra do futuro exigirá que tais tendências tecnológicas nucleares comprovem serem capazes de substituir combustíveis fósseis, em especial em sistemas de propulsão para geração de energia em navios, submarinos e espaçonaves.

4.4.1. Reatores nucleares de potência

Existem cerca de 55 reatores nucleares em construção e cerca de 109 reatores nucleares planejados no mundo. Dentre os já existentes, EUA (97), França (58), China (47), Rússia (36), Coreia do Sul (23), Índia (21), Canadá (18), Inglaterra (15) e Japão (9) são os países que mais possuem reatores nucleares em pleno funcionamento no mundo. Por outro lado, China, Rússia, Índia, Estados Unidos, Coreia do Sul, Emirados Árabes Unidos, Belarus, Paquistão, Eslováquia, Ucrânia, Argentina, Brasil, Finlândia e França são os países que estão construindo reatores nucleares de potência para geração de energia.

O mercado de construção de reatores nucleares que mais cresce é na região Ásia-Pacífico e as principais empresas consideradas *players* neste mercado são: GE-Hitachi Energia Nuclear, Westinghouse Electric Company LLC, Toshiba Energy Systems & Solutions, Korea Electric Power Corporation (KEPCO), SKODA JS e Corporação Nuclear Nacional da China (CNNC). Há outros *players*, tais como a francesa Areva S.A., a russa Rosatom State Atomic Energy Corporation (ROSATOM), a China General Nuclear Power Group (CGN, na sigla em inglês), e a japonesa Mitsubishi Heavy Industries. Este mercado é mais concentrado porque são poucas empresas no mundo que atuam no setor de construção de reatores nucleares.

“O mercado de construção de reatores nucleares que mais cresce é na região Ásia-Pacífico.”

Usinas nucleares são infraestruturas industriais construídas para produzir energia elétrica por meio de reatores por reação de fissão. Os principais tipos de reatores nucleares de potência são: reator refrigerado a água fervente (BWR, na sigla em inglês), reator refrigerado a gás (GCR, na sigla em inglês), reator avançado refrigerado a gás (AGR, na sigla em inglês), reator resfriado a gás de alta temperatura (HTGR, na sigla em inglês), reator gerador de vapor moderado a água pesada (SGHWR), reator refrigerado a água fervente e moderado a grafite (RBMK, na sigla em inglês), reator refrigerado a água pesada pressurizada (PHWR, na sigla em inglês), reator refrigerado a água pressurizada (PWR, na sigla em inglês) e reator regenerador rápido (FBR, na sigla em inglês). Atualmente, 14% da energia elétrica produzida no mundo é oriunda de fonte nuclear. Cerca de 16% dos reatores nucleares de potência em operação no mundo são do tipo BWR e 66% são reatores de potência do tipo PWR.

Reatores nucleares do tipo RBMK, como o do desastre na cidade ucraniana de Chernobyl de 1986, e do tipo BWR, como o do desastre na cidade japonesa de Fukushima em 2011, possuíam a vida útil ultrapassada e, portanto, eram obsoletos. A primeira geração desses reatores, como os de Chernobyl, foi toda descontinuada e a maioria dos que estão em operação são de segunda ou terceira geração. Depois do desastre de Chernobyl envolvendo reatores nucleares, o de Fukushima foi o segundo maior da História.

“Em comparação a Chernobyl, a tecnologia encontrada nos reatores de Fukushima Daiichi era mais segura, possuindo contenção secundária, recipiente de contenção de aço e revestimento de concreto” (Gomes, 2023, p. 4). Importante diferenciar que o desastre de Fukushima não foi originado no núcleo do reator, mas sim de um deslocamento de placas tectônicas no mar que deu origem a um tsunami de cerca de treze metros que, por sua vez, atingiu a Central Nuclear de Fukushima. Esta central, operada pela Tokyo Electric Power Company (TEPCOM), é constituída por seis reatores do tipo BWR e possui capacidade de 4,7 GW.

Enquanto reatores do tipo PWR possuem água a mais de 300°C sob pressão em seu circuito primário de resfriamento/transferência de calor e geram vapor em um circuito secundário no qual o vapor aciona a turbina, reatores do tipo BWR produzem vapor no circuito primário acima do núcleo do reator, com temperaturas e pressões similares. Ambos os tipos de reatores usam água para refrigerar e moderar a fim de retardar os nêutrons liberados pela fissão.

Reatores nucleares do tipo PWR foram desenvolvidos nos EUA inicialmente para propulsão de submarinos e foram adaptados no final da década de 1950 para gerar energia elétrica. O incidente mais grave que envolveu reatores do tipo PWR foi o da usina de Three Mile Island, na Pensilvânia, EUA, em março de 1979. O reator TMI-2 do tipo PWR, em operação com 97% da potência, sofreu mau funcionamento no resfriamento, causando o derretimento de parte do núcleo.

O reator TMI-2 está permanentemente desligado e 99% do seu combustível foi removido. As falhas de segurança evidenciadas no incidente foram corrigidas nos projetos de reatores do tipo PWR subsequentes. Reatores de geração III/III+ introduziram características que permitem a sua refrigeração passiva. Resumidamente, a segurança em reatores nucleares é avaliada sob três princípios: 1) controle e reatividade; 2) resfriamento do combustível; e 3) gerenciamento de resíduos (Gomes, 2023). Seguindo estes princípios, a segurança de reatores nucleares pode ser realizada pelos seguintes sistemas:

1. Inerente: Baseado em princípios físicos intrínsecos. Isso implica que nenhuma interferência humana, nenhum sinal de ativação e nenhum fornecimento de energia externa são necessários para permanecer em uma condição segura, e.g. feedback de reatividade negativa;
2. Passivo: Não requer iniciação ativa ou potência, entram em operação no caso de um acidente, e.g. circulação natural e refrigeração alimentada por gravidade;
3. Projetado/Ativo: Requerem acionamento ativo ou fornecimento de energia, e.g. sistema de refrigeração de emergência, sistemas digitais de proteção de reatores e geradores de emergência a diesel (Gomes, 2023, p. 2).

Logo, em sistemas de segurança passiva não é necessária qualquer intervenção humana para desligar os sistemas, porque os sistemas passivos dependem de fenômenos físicos, como a circulação natural, a convecção, a autopressurização e a gravidade.

Diante da complexidade intrínseca de reatores nucleares, medidas, normas e resoluções de segurança são constantemente atualizadas, e tecnologias e sistemas de segurança são continuamente aprimorados. Nenhuma unidade geradora de energia, independente da fonte, está isenta de provocar riscos, acidentes e desastres. “A estratégia básica da segurança do reator é impedir o sobreaquecimento do combustível, que levaria a fusão ou desintegração do núcleo” (Cerne, 2000, p. 366). Liberações descontroladas de radiação oriundas de incidentes em reatores nucleares podem ocorrer; no entanto, são raras.

A fim de evitar desastres nucleares, acidentes e maiores riscos à saúde da população e ao meio ambiente, “são requeridos grandes esforços durante todas as etapas do projeto, construção, operação, inspeção e manutenção do reator” (Aneel, 2000, p. 366). Dentre as lições aprendidas com o desastre ambiental provocado pelo tsunami que atingiu a Central Nuclear de Fukushima, encontram-se:

- Aumentar a altura dos muros de proteção de usinas nucleares situadas em regiões sujeitas a terremotos e tsunamis.
- Aperfeiçoar o fornecimento externo de energia elétrica (baterias e geradores), de forma a permitir uma maior autonomia do sistema de bombeamento de água para refrigeração do núcleo dos reatores nucleares, em caso de necessidade.
- Implementar reservatórios elevados de água para resfriamento, com acionamento que independa de energia elétrica, de forma que a água desça por gravidade e resfrie o núcleo sem necessidade de bombeamento.
- Melhoria de gestão de riscos de acidentes e criação de um centro de comando para atendimento a emergências (Mata *et al.*, 2015, p. 101-102).

De acordo com a Mordor Intelligence, em março de 2022, a Índia anunciou que está se preparando para começar a construir reatores do tipo PHWR de 700 MWe, na cidade de Kaiga, em Karnataka. Reatores de potência do tipo PWR ou PHWR também podem gerar energia em áreas mais remotas, em especial, nas regiões do Círculo Polar Ártico e do Círculo Polar Antártico. No entanto, um dos principais desafios nos novos projetos de reatores nucleares é a adaptação às adversidades provocadas pelas mudanças climáticas.

A AIEA defende que a energia nuclear seja apropriada para combater o aquecimento global em função da maior segurança e de seus baixos níveis de emissões de gases de efeito estufa (ONU, 2023). Cabe aqui sinalizar importantes discussões e deliberações tomadas durante a Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas (COP28), na qual um grupo de 22 países se comprometeu em triplicar a produção de energia nuclear até 2050, a fim de contribuir com a descarbonização da matriz elétrica e a redução das emissões de gases de efeito estufa na atmosfera do planeta (NEA, 2023).

Como descrito, reatores nucleares do tipo PWR são infraestruturas que contam com aperfeiçoamentos tecnológicos e conceitos operacionais de segurança bem mais modernos que os das gerações anteriores.

Uma das principais vantagens ambientais da geração elétrica através de reatores nucleares de potência é que não emitem gases de efeito estufa e demais toxicidades na atmosfera. Além disso, a principal matéria-prima utilizada na fabricação do combustível nuclear, o urânio, é de baixo custo e não oferece risco de escassez em médio prazo. Durante a operação do reator, parte do Urânio-238 é transformada em Plutônio-239. Este último é um isótopo radioativo, cuja meia-vida é de aproximadamente 24 mil anos. Em muitos países, o Plutônio-239 é reprocessado em reatores nucleares, seja para geração de energia, seja para finalidades militares. No reprocessamento nuclear, o plutônio é separado e recuperado quimicamente em um reator nuclear. No reprocessamento, tanto o plutônio e o urânio físsil quanto os actínídeos podem ser reaproveitados.

“Uma das principais vantagens ambientais da geração elétrica através de reatores nucleares de potência é que não emitem gases de efeito estufa e demais toxicidades na atmosfera. Além disso, a principal matéria-prima utilizada na fabricação do combustível nuclear, o urânio, é de baixo custo e não oferece risco de escassez em médio prazo.”

Por decisão política e econômica, o Brasil não realiza a etapa de reprocessamento do urânio em território nacional. A decisão é política à medida que há esforços de políticos e da Marinha do Brasil em afastar suspeitas internacionais, em especial, da AIEA, de qualquer relação dos programas e projetos nucleares em andamento com o desenvolvimento de armas nucleares. O Brasil renunciou o uso de armas nucleares na sua própria Constituição, assinou o Tratado de Não Proliferação de Armas Nucleares (TNP) e estabeleceu um acordo de cooperação com a Agência Brasileiro-Argentina de Contabilidade e Controle de Materiais Nucleares (ABACC) e com a AIEA que incluem inspeções mútuas e regulares em suas instalações nucleares.

O reator nuclear Angra 1 opera com 121 e o reator nuclear Angra 2 opera com 193 elementos combustíveis. Denomina-se elemento combustível o conjunto de varetas que contém pastilhas com urânio enriquecido que geram energia em reatores nucleares. Quando o elemento combustível não apresenta mais condições de gerar energia economicamente viável, ele é denominado elemento combustível irradiado (ECI). No Brasil, a cada 3 anos, a Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (CNAAA) substitui o ECI dos dois reatores nucleares. Caso o Brasil decida politicamente fazer novo uso para o ECI, ou seja, reprocessá-lo, será necessário tornar este processo menos custoso para o Estado. Por enquanto, além de o governo brasileiro não estar interessado em explorar novas modalidades de negócios para o ECI, economicamente, manter as etapas mais convencionais de produção do combustível nuclear na INB ainda é mais barato que reprocessar o ECI.

Como os ECI possuem ainda alta radioatividade, são alocados em depósitos, em terrenos geologicamente selecionados, envolvendo diversos tipos de tratamentos químicos. Através do reprocessamento, os ECI ainda podem ser reaproveitados para fins comerciais. Daí não serem considerados rejeitos, ou mais convencionalmente chamados de lixo nuclear. No Brasil, os ECI ficam temporariamente armazenados em piscinas especiais com água borada, dentro de instalações de segurança da CNAAA, até que o governo decida dar novas finalidades comerciais para estes elementos ou encontrar depósitos definitivos até que a radioatividade dos ECI decaia e não ofereça mais riscos irreversíveis à saúde humana e animal, nem ao meio ambiente. Este decaimento pode durar milhões de anos.

Dentre as aplicações comerciais de ECI exploradas pela NASA e pela Agência Espacial Europeia (ESA, na sigla em inglês), por exemplo, encontram-se os Geradores Termoelétricos de Radioisótopos (RTG, na sigla em inglês). Ou seja, os mesmos países que manifestam preocupações político-estratégicas com proliferação de armas nucleares e pressionam governos a renunciar o uso da energia nuclear, mesmo para fins pacíficos, reprocessam seus ECI e os utilizam para impulsionar seus projetos científicos e tecnológicos e suas economias.

RTG são um tipo de Sistema de Energia de Radioisótopos (RPS, na sigla em inglês) que convertem o calor da decomposição natural de materiais radioisótopos em eletricidade. A título de exemplo, o Departamento de Energia (DoE) dos EUA desenvolveu para a NASA o veículo não tripulado Curiosity para coletar amostras e imagens do solo e da atmosfera do planeta Marte e analisar e investigar possíveis evidências de vida neste planeta no âmbito da missão denominada “Mars Science Laboratory (MSL)”. Este *rover* foi lançado em novembro de 2011 e pousou com sucesso em Marte em agosto de 2012 com o objetivo de determinar se Marte alguma vez foi capaz de sustentar vida microbiana. Este veículo não tripulado gera cerca de 110 watts de energia elétrica no lançamento e carrega um sistema de energia radioisótopo, denominado Gerador Termoelétrico de Radioisótopos Multimissão (MMRTG, na sigla em inglês), que gera eletricidade a partir do calor do decaimento radioativo do plutônio.

Antes de o MMRTG ser enviado ao local de lançamento, o plutônio-238 é inserido no MMRTG, no Laboratório Nacional de Idaho do DoE (NASA, 2019). O MMRTG utiliza o calor do decaimento radioativo natural do plutônio-238 para gerar eletricidade e calor na missão. Parte deste calor mantém a operacionalidade dos sistemas do *rover* nas baixas temperaturas tanto no espaço quanto na superfície marciana. O MMRTG embarcado no Curiosity foi desenvolvido pelo Departamento de Energia dos EUA (DoE) e fornecido à NASA para aplicações espaciais de uso civil. Versões eletricamente aquecidas do MMRTG são usadas no Laboratório de Propulsão à Jato (JET, na sigla em inglês) da NASA para testar e integrar o sistema de energia com o *rover*.

Em continuação à missão em Marte, a Nasa lançou o *rover* Perseverance, o qual também possui a bateria nuclear MMRTG. A bateria do Perseverance carrega 4,8 quilos de dióxido de plutônio como fonte de eletricidade e calor. Em regra geral, o MMRTG permite que a equipe do Perseverance maximize as capacidades operacionais do *rover* e de seus instrumentos científicos em detrimento das limitações associadas aos painéis solares, como as variações diárias e sazonais da luz solar em Marte e o acúmulo de poeira fina marciana.

Especificamente no caso brasileiro, por decisão política interna, o país não reprocessa e não reaproveita o Plutônio-239. Por ainda armazenarem muita energia, o Plutônio-239 e actíni-

deos, inicialmente, são armazenados, em racks instalados dentro das piscinas existentes nas duas usinas nucleares brasileiras. Segundo a estatal Eletronuclear, as piscinas possuem um sistema de troca de calor que permite remover o calor residual gerado pelos combustíveis armazenados. Acima dos elementos combustíveis há uma camada de aproximadamente 7 metros de água borada, que tem a função também de blindagem, para reduzir a radiação a níveis adequados, para os operadores da usina que trabalham ao redor da piscina¹³.

Após o esgotamento das piscinas, os resíduos irradiados devem ser transferidos para outras unidades de armazenamento em condições geológicas, geotécnicas, meteorológicas e hidrológicas adequadas para abrigá-los.

Ainda quanto ao cenário brasileiro neste tipo de produção energética, embora as reservas brasileiras de urânio estejam distribuídas por diversos estados brasileiros, a Unidade de Concentração de Urânio implantada no município de Caetité, na Bahia, é a única em atividade de exploração mineral no Brasil.

Estima-se que o Brasil disponha em sua totalidade de 232.813 toneladas de concentrado de óxido de triurânio (U₃O₈), mas as Indústrias Nucleares do Brasil (INB) produziram 87 mil toneladas de U₃O₈, distribuídas em 17 depósitos em Caetité. A INB domina todo o ciclo do combustível nuclear, desde a produção de concentrado de U₃O₈ até a fabricação do elemento combustível.

No Brasil, cabe à estatal Eletronuclear (ETN) operar e construir usinas nucleares. Por meio do sistema elétrico interligado, a ETN responde pela geração de aproximadamente 3% da energia elétrica consumida no Brasil. A capacidade de geração de Angra 1 é de 640 MWe e de Angra 2 é de 1.350 MWe. A usina nuclear de Angra 3, quando entrar em operação, terá capacidade de 1.405 MWe.

De acordo com a Mordor Intelligence (2021, p.1), “o baixo custo inicial de instalação e a maior segurança das energias renováveis criam uma procura adicional de energias renováveis para gerar eletricidade, o que provavelmente restringirá o crescimento do mercado durante o período de previsão”. Em comparação com a produção de biocombustíveis, usinas nucleares ocupam áreas relativamente pequenas, podem ser instaladas próximas aos centros consumidores e não dependem de fenômenos climáticos para operarem.

Embora existam estudos de viabilidade no Brasil para a implantação de uma segunda central nuclear, não há nenhuma iniciativa do Ministério da Defesa ou das Forças Armadas brasileiras de construir reatores nucleares de alta potência para aumentar a eficiência energética de bases militares.

“Embora existam estudos de viabilidade no Brasil para a implantação de uma segunda central nuclear, não há nenhuma iniciativa do Ministério da Defesa ou das Forças Armadas brasileiras de construir reatores nucleares de alta potência para aumentar a eficiência energética de bases militares.”

4.4.2. Pequenos reatores modulares avançados

De acordo com a empresa de consultoria especializada em tendências tecnológicas de mercados Fairfield Market Research (2023), o tamanho do mercado global de SMR deverá alcançar receita de nove bilhões de dólares até o final de 2030, com projeção de crescimento de quase 9,5% entre 2023 e 2030. A maior demanda de crescimento, com mais de 80% de participação em valor, é na região Ásia-Pacífico.

O crescente interesse nos SMR deve-se principalmente à necessidade de reduzir os custos totais de capital das centrais nucleares e de garantir fornecimento de energia ininterrupto a cidades inteligentes e projetos de infraestruturas através de pequenos sistemas ligados à rede. Isso, por sua vez, leva a que mais projetos atinjam estágios avançados de desenvolvimento.

13. Para conhecer melhor o gerenciamento de resíduos da Eletronuclear, acesse [aqui](#).

Em áreas onde faltam linhas de transmissão e capacidade de rede suficientes, os SMR podem ser instalados numa rede existente ou remotamente fora da rede, em função da sua menor produção eléctrica, fornecendo energia com baixo teor de carbono para a indústria e a população (Liou, 2023, p. 3).

Figura 9. Comparação entre reatores nucleares, SMR e microrreatores



Fonte: Liou, 2023, p.1 (adaptado pela autora)

Conforme ilustração da figura 9 acima, os SMR são reatores nucleares avançados que têm capacidade de potência de até 300 MWe. Comparativamente, SMR possuem cerca de um terço da capacidade de geração dos reatores nucleares de potência e podem produzir grande quantidade de energia com baixa ou nenhuma emissão de carbono. Por serem pequenos, de design simplificado e modulares, estes pequenos reatores permitem que sistemas e componentes sejam montados ou pré-montados nas fábricas e transportados por quaisquer vias para o local de instalação.

“Por serem pequenos, de design simplificado e modulares, estes pequenos reatores permitem que sistemas e componentes sejam montados ou pré-montados nas fábricas e transportados por quaisquer vias para o local de instalação.”

Enquanto em reatores nucleares de potência, a troca do elemento combustível ocorre a cada dois anos no máximo; em SMR, a troca do elemento combustível pode ocorrer entre três e sete anos. Segundo a Fairfield Market Research (2023, p.2), “o custo total por kW de eletricidade gerada por uma pequena unidade de reator modular de 114 MW é de US\$ 2.653, em comparação com US\$ 4.764 por kW de uma unidade convencional de reator de água pressurizada de 1.144 MW”.

“O conceito de segurança para SMR geralmente depende mais de sistemas passivos e de características de segurança inerentes ao reator, como baixa potência e pressão operacional” (Liou, 2023, p. 3). Os SMR, em geral, são dos tipos PWR e PHWR. Com 66% de participação, o tipo PWR lidera a receita no mercado global de SMR. Mas existem SMR que fazem uso de outros tipos de refrigeração, como os modelos chineses de SMR High Temperature Gas Cooled Reactor - Pebble-Bed Module (HTR-PM). “Este reator modular foi projetado para otimizar a eficiência energética e é ideal para adicionar pequena capacidade incremental às redes de energia” (Fisher, 2017, p. 19).

O HTR-PM é um SMR do tipo HTGR projetado pelo Instituto de Tecnologia Nuclear e Nova Energia (INET) da Universidade Tsinghua da China, que possui capacidade de 200 MWe e faz uso de tecnologia de reprocessamento do ciclo de combustível do tório. Instalado em Rongcheng, província de Shandong, na China, “este tipo de reator também é adequado para a aplicação de energia e cogeração de calor, em especial para aplicação de calor a níveis de temperatura mais elevados” (Fisher, 2017, p. 19).

Os principais *players* do mercado de SMR são: Bechtel Corporation, China National Nuclear Corporation, BWX Technologies Inc, Westinghouse, GE, ROSATOM, Mitsubishi Heavy Indus-

tries, Ltd, Holtec International, General Atomics, Rolls Royce, Nuclear Power Corporation of India Limited (NPCIL), NuScale Power, LLC, Kepco, Tractebel e Nuward.

Em 2022, os principais SMR eram: CNP-300 (China), PHWR-220 (Índia), EGP-6 (Sibéria), KLT-40S (Rússia) e RITM-200 (Rússia). A construção dos SMR KLT-40S do tipo PWR começou em 2008 no Estaleiro Báltico em São Petersburgo sob encomenda da JSC Rosenergoatom, sociedade anônima que opera as usinas nucleares russas e é uma *joint venture* russa subordinada à United Shipbuilding Corporation. Os SMR KLT-40S baseiam-se em tecnologias semelhantes utilizadas nos navios quebra-gelos nucleares russos, Taimyr e Vaygach, existentes desde 1988. Estes modelos de reatores funcionaram sem falhas desde então nas mais adversas condições na região do Ártico. A usina nuclear flutuante possui dois SMR KLT-40S do tipo PWR com capacidade de 35 MWe por unidade e tiveram suas operações comerciais iniciadas em maio de 2020, na cidade portuária de Pevek, no distrito autônomo de Chukotka, na região ártica russa.

A central nuclear flutuante constituída pelos dois SMR é denominada Akademik Lomonosov. O ciclo de vida de um SMR KLT-40S é de 40 anos, podendo ser estendido por mais dez anos, e são reabastecidos a cada três anos.

A central permitirá o fornecimento de energia fiável, segura e acessível e garantirá o desenvolvimento sustentável das principais indústrias na região de destino, Chukotka. O FNPP [Unidade Nuclear Flutuante] “Akademik Lomonosov” substituirá a antiga central nuclear de Bilibino e a central eléctrica a carvão de Chaunsk de Pevek, poupando cerca de 50.000 toneladas de emissões de CO₂ por ano em comparação com os níveis atuais. O futuro de toda a região de Chukotka — a região climática mais remota e mais extrema da Rússia — e de todos os seus 50.000 habitantes depende deste projeto¹⁴ (Akademik Lomonosov, 2022, p. 1).

A OKBM Afrikantov e o Instituto de Design Especializado do Estado (GSPI, na sigla em russo), ambos subordinados à estatal russa ROSATOM, desenvolveram a partir das experiências e conhecimentos adquiridos no SMR KLT-40S, o RITM-200, um novo tipo de reator avançado PWR de terceira geração, baseado em terra e 45% menor que o KLT-40S. Em fevereiro de 2020, por meio da parceria entre o Ministério para o Desenvolvimento do Extremo Oriente Russo, a República de Sakha e a ROSATOM, iniciou-se o planejamento da construção da usina nuclear modelo RITM-200N com capacidade de 55 MWe, na cidade de Yakutia, na República de Sakha, entre a Sibéria e o extremo leste da Rússia. O objetivo é construir um SMR do tipo PWR capaz de gerar energia sem intermitência e com custos mais acessíveis para viabilizar a economia do setor russo de mineração na região do Ártico.

Considerando as adversidades climáticas com temperaturas que a intitulam como uma das cidades mais frias do mundo, um dos principais desafios das subsidiárias da ROSATOM é construir um reator RITM-200 para atender demandas de consumo de energia do setor de mineração de ouro e de diamante na região. Empresas russas têm estabelecido diversos acordos com governo locais para construir reatores RITM em áreas de mineração remotas em terra e no mar, sobretudo, na região ártica.

O consumo de energia pelo setor de mineração é muito alto. Dada a inserção cada vez maior de tecnologias emergentes na economia circular, como acumuladores de energia, células fotovoltaicas e circuitos eletrônicos, o consumo de energia e o custo da eletricidade aumentarão significativamente. De acordo com o Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM), a busca por minerais críticos para atender demandas da transição energética exigirá investimentos de mais de 60 bilhões de dólares entre 2024 e 2028, o que significa uma alta de 28,8% em relação ao período de 2023 a 2027 (Rosa, 2024, p. 2). Yakutia, por exemplo, é rica em ouro, responsável por 25% do abastecimento mundial de diamantes brutos e centraliza muitas empresas de mineração. A ROSATOM pretende iniciar a construção em 2024 e comissionar a unidade até 2028.

Em outubro de 2023, Estados Unidos, Japão e Gana anunciaram parceria para apoiar a implantação de uma central nuclear NuScale VOYGR SMR no país africano no âmbito do

14. Para saber mais informações sobre esta central nuclear flutuante, acesse [aqui](#).

programa de Infraestruturas Fundamentais para a Utilização Responsável da Tecnologia de Reatores Modulares Pequenos (FIRST, na sigla em inglês) do Departamento de Estado estadunidense. O FIRST presta apoio ao reforço de capacidades aos países parceiros, à medida que desenvolvem os seus programas de energia nuclear com foco em energia limpa, considerando requisitos internacionais de segurança, proteção e não proliferação nuclear.

Já no Brasil, visando a redução das emissões de carbono, a estatal Amazônia Azul Tecnologias de Defesa S.A. (AMAZUL) está se estruturando para propor um projeto de SMR, baseando-se no conhecimento tecnológico adquirido no desenvolvimento do protótipo do reator do tipo PWR de propulsão naval que será empregado no futuro submarino convencional com propulsão nuclear (SCPN). Dentre outras inovações, a AMAZUL pretende incorporar ao seu projeto de SMR tecnologias presentes em reatores nucleares de quarta geração e sistemas de segurança passiva.

Atualmente, têm surgido na mídia brasileira notícias em defesa da instalação de SMR na Amazônia brasileira para substituir usinas térmicas à base de óleo diesel, com o objetivo de melhor aproveitar as reservas nacionais de urânio, reduzir a despesa anual de 12 bilhões de reais com a operação das usinas térmicas e contribuir com a maior descarbonização na região amazônica. O Ministro de Minas e Energia, Alexandre Silveira, em 25 de novembro de 2024, publicou uma matéria na revista Exame intitulada “Mais energia nuclear para garantir a transição energética”, defendendo o emprego de SMR para diversas atividades comerciais, dentre elas: a geração elétrica e de calor na indústria siderúrgica, a produção de hidrogênio rosa, a geração de energia para datacenters inteligentes e o fornecimento de eletricidade para comunidades isoladas da Amazônia que não estejam conectadas ao Sistema Interligado Nacional (SIN) (Silveira, 2024).

“Harlow (2023) propõe que, diante do desafio existencial provocado pelas mudanças climáticas, as Forças Armadas estadunidenses construam e operem SMR e microrreatores para gerar energia em bases militares estadunidenses em território nacional e em território internacional em apoio às tropas nos teatros de operações no exterior.”

4.4.3. Microrreatores nucleares

A AIEA define microrreatores como um subconjunto de SMR projetados para gerar energia elétrica normalmente de até 10 MW. Embora a capacidade de geração de energia de microrreatores ainda esteja em definição quando comparado com SMR, existem diversos projetos de microrreatores nucleares em andamento no mundo.

Os microrreatores ocupam menos espaço do que outros SMRs e serão mais adequados para regiões inacessíveis à energia limpa, confiável e acessível. Além disso, os microrreatores poderiam servir como fonte de energia de reserva em situações de emergência ou substituir geradores de energia que são frequentemente alimentados a diesel, por exemplo, em comunidades rurais ou empresas remotas (Liou, 2023, p. 3).

Harlow (2023) propõe que, diante do desafio existencial provocado pelas mudanças climáticas, as Forças Armadas estadunidenses construam e operem SMR e microrreatores para gerar energia em bases militares estadunidenses em território nacional e em território internacional em apoio às tropas nos teatros de operações no exterior. Em defesa da expansão de programas de energia nuclear para aumentar as capacidades de combate dos militares estadunidenses, Harlow (2023) cita duas iniciativas: 1) o projeto PELE do Pentágono e 2) o plano da Força Aérea dos EUA de operar um reator modular na Base Aérea de Eielson, no Alasca.

O Escritório de Capacidades Estratégicas do DOD selecionou a empresa estadunidense BWXT Advanced Technologies para construir o primeiro micro reator nuclear avançado transportável, denominado PELE, capaz de “fornecer uma fonte de energia resiliente ao DOD para uma variedade de necessidades operacionais que historicamente dependiam de fornecimentos de combustíveis fósseis e extensas linhas de abastecimento” (EUA, 2022, p. 1).

O PELE é um microrreator, refrigerado a gás de alta temperatura (HTGR, na sigla em inglês), que operará em um nível de potência entre um e cinco MWe e poderá ser transportável em contêineres comercialmente disponíveis. Na guerra do futuro, diante da potencial capacidade de inimigos perturbarem as linhas de comunicação, especialmente em remessas a granel, como o óleo combustível, “os reatores nucleares modulares reduziram a dependência dos militares dos EUA em relação aos envios de combustível e garantiriam a disponibilidade da energia necessária para sistemas de combate de alta tecnologia” (Harlow, 2023, p. 3-4).

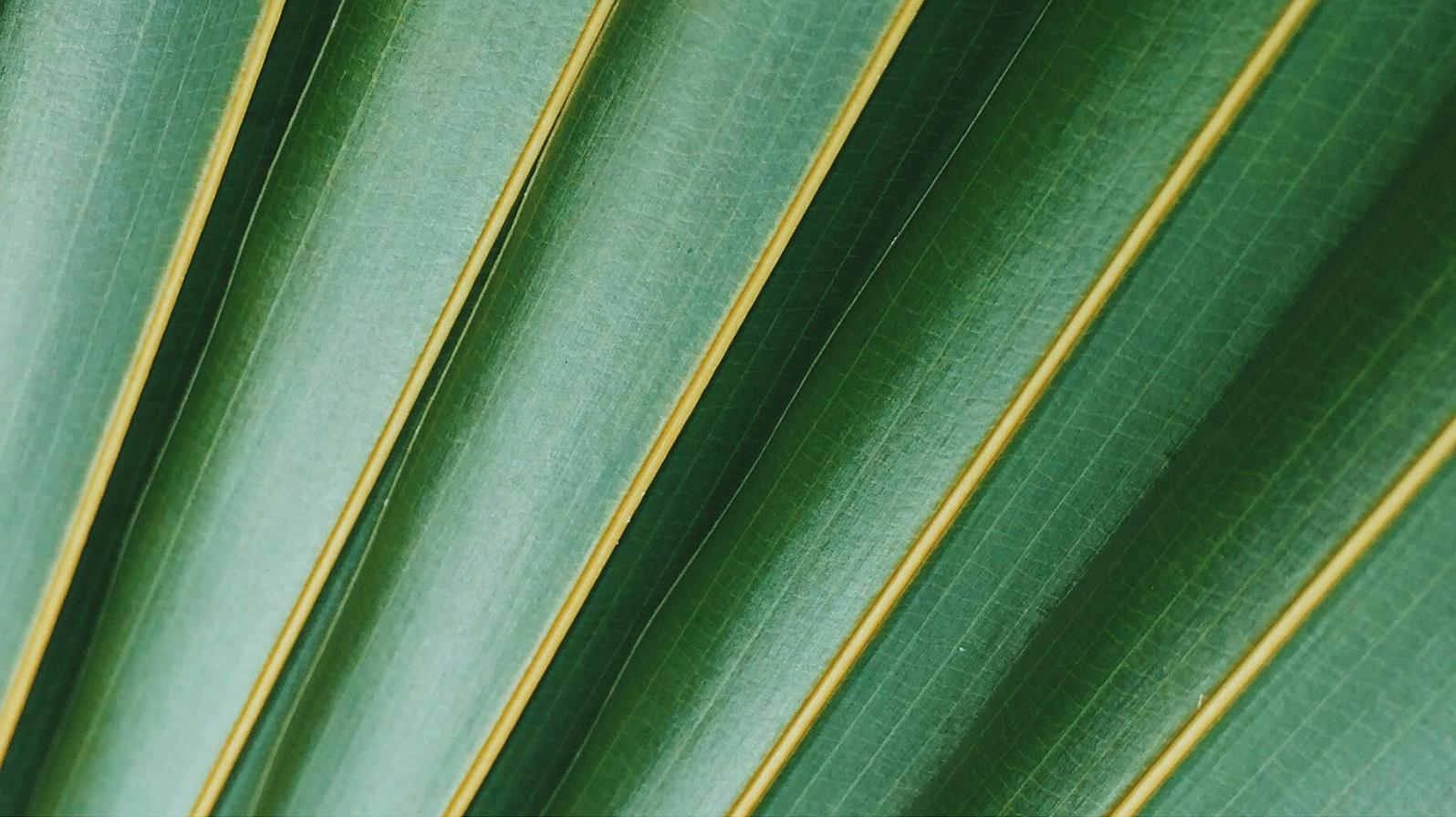
No caso brasileiro, existe o projeto de microrreator nuclear denominado Terra conduzido pela Divisão de Energia Nuclear do Instituto de Estudos Avançados (IEAV), organização militar subordinada à Força Aérea Brasileira. O Terra é um projeto de reator rápido de quarta geração com capacidade inferior a quatro MWe. Este tipo de reator nuclear nasceu de uma demanda da ONU, endossada pela AIEA, na qual foram solicitados novos projetos de reatores nuclear que seguissem os seguintes princípios: (1) atendam aos requisitos de segurança inerente; (2) tornassem inviável definitivamente a proliferação de armas nucleares; (3) sejam economicamente competitivos; e (4) ecologicamente aceitáveis. Surgiram, assim, os reatores rápidos de quarta geração, os quais compreendem reatores rápidos refrigerados a metal líquido (sódio, chumbo, etc), reatores avançados de alta temperatura e refrigerados a gás, reatores que utilizam queima não-convencional, reatores molten salt e de conversão direta, entre outros¹⁵.

“No caso brasileiro, existe o projeto de microrreator nuclear denominado Terra conduzido pela Divisão de Energia Nuclear do Instituto de Estudos Avançados (IEAV), organização militar subordinada à Força Aérea Brasileira.”

As atividades do Terra visam o desenvolvimento de um sistema compacto de geração de energia multipropósito, tendo como projeção o emprego da tecnologia nuclear no espaço e em áreas de desastres naturais. Dentre as aplicações deste projeto no Brasil, encontram-se: a viabilização da exploração econômica do espaço por propulsão nuclear elétrica, a constância no fornecimento de energia elétrica em plataformas de petróleo no mar e a geração de energia elétrica em áreas de energia negada, seja por ação humana, ou desastres naturais.

Em outubro de 2019, Lamartine Nogueira Frutuoso Guimarães, chefe da ENU/IEAV e pesquisador-líder do projeto, apresentou o Terra no International Nuclear Atlantic Conference – INAC 2019 atualizando sobre o andamento do projeto. De acordo com Guimarães (2019), na época, a pesquisa incluía a construção do CBF, protótipo para conversão de calor em energia elétrica, e que a parte nuclear deste projeto estava sendo desenvolvida por simulação numérica. A FAB não ainda não anunciou o estágio atual em que o projeto Terra se encontra dentro do IEAV; no entanto, importante ressaltar que, caso decida por não dar continuidade ao projeto, a FAB avalie a possibilidade de transferir o conhecimento desenvolvido ao longo do desenvolvimento e a tecnologia até então desenvolvida para a indústria. Uma das empresas brasileiras que podem se interessar em absorver conhecimentos e tecnologias deste projeto é a estatal Amazônia Azul Tecnologias de Defesa S.A. (AMAZUL).

15. Para conhecer mais sobre estes tipos de reatores nucleares, acesse [aqui](#).



5.

Combustíveis sustentáveis com potencial interesse da Defesa

Com base nas análises dos critérios e condições destacados anteriormente, os combustíveis sustentáveis inovadores com potencial interesse da Defesa estão dispostos na tabela 5, a seguir.

Tabela 5. Combustíveis sustentáveis com potencial interesse da Defesa

BIOCOMBUSTÍVEIS	HEFA	Fame B20	Diesel Verde R10
BATERIAS ELÉTRICAS	Baterias de íons-lítio	Baterias de lítio-ar	
REATORES NUCLEARES	Pequenos Reatores Modulares	Microrreatores	
HIDROGÊNIO	Hidrogênio Verde		

Fonte: elaborado pela autora

Como mencionado, a eficiência energética destes combustíveis sustentáveis é presumida, já que boa parte deles ainda está sendo testada em ambientes operacionais ou no início de suas inserções mercadológicas. As mudanças climáticas exigem urgentemente que a transição energética ocorra e têm orientado processos de substituição de combustíveis fósseis por combustíveis sustentáveis. De maneira geral e dependendo do modelo adotado, a substituição por combustíveis sustentáveis pode promover maior crescimento econômico, melhorar as condições de trabalho e a qualidade de vida de trabalhadores de diversos setores, desde mineradores até petroquímicos, otimizar a automatização dos meios de produção e implantar novos processos educacionais e organizacionais (Corrêa, 2021).

O processo de substituição se inicia de forma lenta até que sejam superados os problemas e as resistências iniciais, quando então o processo ocorre de forma mais rápida até que a competição entre a velha e a nova tecnologia se torne mais forte e a nova tecnologia se torne mais vantajosa, e finalmente esta se aproxima da saturação e inicia um processo de declínio, ao mesmo tempo em que outra tecnologia, ganha aceitação, principalmente pelo fato de ser mais eficiente; é quando então o processo se reinicia (Reddy, 1996 *apud* Balestieri, 2014).

Mesmo no mundo globalizado do século XXI, questões ambientais ainda são um dilema político-militar diante do exercício pleno da soberania e da inviolabilidade territorial dos Estados. Neste sentido, em um cenário de guerra, nenhum Estado renunciará suas capacidades de Defesa nos teatros operacionais se a sua soberania e o seu território estiverem em xeque. Contudo, a crescente pressão para reduzir as emissões coloca as forças armadas diante de um imperativo de inovação. Em relatório lançado em julho de 2024, a OTAN aborda a necessidade de adaptação das capacidades militares para manter tanto a efetividade operacional, quanto para endereçar os desafios impostos pela mudança do clima (OTAN, 2024).

Em um futuro próximo, à medida que os combustíveis sustentáveis aumentem sua eficiência energética e a capacidade de agregar vantagem estratégica nos teatros operacionais, a adaptação para uma “guerra de baixo carbono” se tornará não apenas uma possibilidade, mas uma exigência estratégica para as Forças Armadas. Integrar tecnologias de baixa emissão e reformular operações para minimizar a dependência de combustíveis fósseis será fundamental para preservar a eficácia militar em um mundo que avança em direção ao zero carbono.



6.

Desafios futuros e recomendações

As plataformas de pesquisa científicas e tecnológicas do governo, como o Diretório de Grupos de Pesquisa do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Plataforma Nacional de Infraestrutura de Pesquisa (PNIPE), ambas do Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), reúnem diversos grupos de pesquisa e laboratórios envolvidos em desenvolvimentos tecnológicos. A figura 10 a seguir ilustra o mapeamento de grupos e laboratórios cadastrados no CNPq e/ou na PNIPE nas três áreas tecnológicas de interesse da Defesa: energias renováveis, armazenamento de energia e reatores nucleares.

Na área de energias renováveis, foram mapeados 60 grupos/laboratórios de pesquisa. Na área de armazenamento de energia, foram mapeados 64 grupos/laboratórios de pesquisa. E na área de reatores nucleares, foram mapeados apenas nove grupos/laboratórios de pesquisa. Em cada um destes grupos ou laboratórios de pesquisa é possível obter informações como áreas de atuação, formas de contatos, linhas de pesquisa e a quantidade de pesquisadores em cada uma delas, a qualificação de cada um destes pesquisadores, existência de vínculos com redes e instituições parceiras, e aquisição de equipamentos e softwares de alta complexidade.

A região Sudeste lidera o cadastramento destes grupos/laboratórios de pesquisa nas três áreas tecnológicas de interesse da Defesa; no entanto, como é possível visualizar, nas áreas de energias renováveis e armazenamento de energia, a região Nordeste apresenta diversos grupos/laboratórios de pesquisa. Neste Estudo, foi citada, por exemplo, a planta piloto de hidrogênio verde que está sendo construída no SENAI CIMATEC, em Salvador, aproveitando a grande potencialidade local de fontes renováveis locais, como eólica e solar.

Das cinco regiões brasileiras, a região Centro-Oeste é a que manifesta a menor participação de grupos/laboratórios de pesquisa no desenvolvimento de tecnologias verdes. Na área de energias renováveis, o único grupo mapeado na região Centro-Oeste é o Grupo de Novos Materiais para Catálise Química Sustentável, vinculado ao Instituto de Química da Universidade de Brasília (UnB). As linhas de pesquisa deste grupo que podem interessar à Defesa na área de energias renováveis são: 1) desenvolvimento de catalisadores para produção de

Biodiesel; 2) produção de Bio-Etileno via desidratação catalítica de Bio-Etanol; e 3) síntese, caracterização e aplicação de novos materiais.

Figura 10. Quantidade de nichos tecnológicos de interesse da Defesa por distribuição geográfica



Fonte: elaborado pela autora.

Na área de armazenamento de energia, o único destaque do Centro-Oeste é o Grupo de Ensino, Meio Ambiente, e Tecnologias em Eletroquímica (Gemate), vinculado ao Instituto Federal Goiano (IFG). As linhas de pesquisa deste grupo que podem ser interessantes para a Defesa na área de armazenamento de energia são: 1) bio-energia com captura e armazenamento de carbono e 2) células a combustível, sistema de armazenamento de energia e processos eletrooxidativos avançados. Nesta região, não existem grupos/laboratórios cadastrados no CNPq ou na PNIPE que atuem na área de reatores nucleares.

Existem outros grupos e laboratórios de pesquisa distribuídos pelo Brasil que, não necessariamente, estão cadastrados no CNPq e/ou na PNIPE, mas que atuam no desenvolvimento científico e tecnológico em áreas de interesse da Defesa. A relevância de utilizar informações e dados destas plataformas é que elas permitem dar maior visibilidade aos grupos e laboratórios de pesquisas cadastrados. A maior visibilidade se torna interessante para apoiar processos decisórios à medida que o setor de Defesa necessite fomentar maior cooperação científica e tecnológica entre as organizações citadas no âmbito da Tríplice Hélice.

É estratégico para a Defesa que, diante das mudanças climáticas, cada vez mais empresas brasileiras e seus combustíveis sustentáveis sejam cadastrados no SISCAPED. Além de benefícios tributários, as Forças Armadas brasileiras poderão usufruir de combustíveis sustentáveis em seus meios operacionais com insumos energéticos nacionais, como fontes renováveis e minerais críticos, que poderão aumentar suas capacidades de Defesa e se tornar surpresas estratégicas na guerra do futuro. Neste Estudo, foram citadas três empresas brasileiras que possuem combustíveis sustentáveis cadastrados como produtos no SISCAPED: PETROBRAS, Bnpetro e a INB. Existem empresas e startups brasileiras em todo o País atuando, principalmente, nas áreas de energias renováveis e armazenamento de energia. Na área de armazenamento de energia, por exemplo, foi citado neste Estudo o projeto de baterias de íons-lítio desenvolvido por meio de parceria estabelecida entre a Fiat Chrysler Automobiles, o ISI em Eletroquímica do Paraná e o CPQD. À medida que for criado o centro de competência com foco no desenvolvimento de baterias de íons-lítio no Paraná, o MD e as Forças Armadas brasileiras podem propor cooperação científica e tecnológica para aplicações em Defesa, como em sistemas e veículos não tripulados, datacenters, viaturas militares, etc.

“É necessário que o MD estimule a cooperação científica e tecnológica entre centros de pesquisa, empresas, startups e Forças Armadas.”

É necessário que o MD estimule a cooperação científica e tecnológica entre centros de pesquisa, empresas, startups e Forças Armadas. Ressalta-se também a importância de se recorrer à captura de fomentos junto a agências estaduais, FINEP, EMBRAPPII, fundos de CT&I de agências reguladoras e de autarquias, e linhas de crédito especiais de bancos públicos nacionais. Todas estas agências de fomento e entidades bancárias já conduzem programas, respectivamente, de financiamento reembolsável e não reembolsável, e linhas de crédito voltadas para sustentabilidade. O BNDES possui um histórico de relacionamento com a BID, mas os demais

bancos públicos ainda não possuem. É preciso que, além do BNDES, o MD recorra aos demais bancos públicos, como o Banco do Brasil (BB), a Caixa Econômica Federal (CEF), o Banco da Amazônia (BASA), o Banco do Nordeste (BNB), o Banco do Rio Grande do Sul (BANRISUL) e o Banco do Estado do Espírito Santo S.A (BANESTES), para identificar oportunidades de financiamentos e propor políticas públicas para obtenção de fundos de investimento com a finalidade de apoiar o desenvolvimento e a sustentabilidade da BID.

Não há competição entre produtores de biocombustíveis com o setor agropecuário no Brasil. O Brasil é um país com 8.515.767,049 km² dos quais apenas 7,8% do território nacional até 2016 eram áreas agrícolas cultivadas. O Brasil é um país povoado e pouco populoso, à medida que a grande concentração de habitantes está localizada em áreas litorâneas. Ou seja, há ainda enormes áreas com potencial agrícola no País que tendem a assegurar que, no longo tempo, não haja competição entre a produção de alimentos e a produção de combustíveis. Além disso, a própria agricultura brasileira já pode desfrutar de técnicas e tecnologias sustentáveis disponíveis no País que podem aumentar a safra anual de grãos, por exemplo, sem necessariamente ampliar o uso da terra.

Ainda na questão dos biocombustíveis, práticas de desmatamento e alto consumo de água doce são preocupações permanentes para a cadeia produtiva à medida que extinguem os sumidouros de carbono e as reservas de água doce, sobretudo em áreas remotas do interior do Brasil. Quanto maior a presença de sumidouros de carbono, como florestas, solos e oceanos, maior será a captura de carbono da atmosfera. Daí a necessidade de maior conscientização sobre práticas mais sustentáveis no uso da terra, da qualidade da água de rios e oceanos, e de reflorestamento.

Há anos, a Marinha do Brasil manifesta esta preocupação e tem trabalhado para melhorar a qualidade da água e de solos onde desenvolvem suas atividades. Dentre os programas estratégicos que buscam a renovação da Esquadra Naval, encontram-se: a Construção do Núcleo do Poder Naval e a Obtenção da Capacidade Operacional Plena. O Programa Fragata Classe Tamandaré, por exemplo, faz parte da Construção do Núcleo do Poder Naval e prevê a construção de quatro novos navios-escolta que serão incorporados à Esquadra. A Empresa Gerencial Projetos Navais (EMGEPRON), estatal vinculada à Marinha do Brasil, vem realizando estudos para aumentar a eficiência energética de bases navais.

A Marinha do Brasil teve também que fazer tratamento químico para melhorar a qualidade do solo e das águas na região que circundam o Estaleiro e a Base Naval, em Itaguaí, região litorânea do estado do Rio de Janeiro, no início das atividades do Programa de Desenvolvimento de Submarinos (PROSUB). A Força Naval também faz teste e acompanhamento químico para garantir a qualidade das águas de rios que circundam a região de Aramar, interior do estado de São Paulo, onde se desenvolvem atividades do LABGENE, parte do Programa Nuclear da Marinha. Em parceria com a Petrobras, a Marinha do Brasil vem estudando também os impactos da introdução acidental do coral sol, espécie de corais invasora e predatória, em águas brasileiras nas décadas de 1980 e 1990. A presença destes corais em águas brasileiras reduz a biodiversidade e a abundância de espécies nativas, prejudica a produção pesqueira e a disponibilidade de alimentos de qualidade em estados onde há registros de ocorrência do coral sol na zona costeira, como Rio de Janeiro, Bahia, São Paulo, Espírito Santo, Santa Catarina e Ceará.

Todos estes programas estratégicos e projetos de P&D da Marinha do Brasil colaboram com a maior conscientização sobre o melhor uso dos sumidouros de carbono tanto em águas doces e salgadas quanto em solos e florestas, e com a redução de gases de efeito estufa na atmosfera.

Sobre baterias elétricas, embora existam diversas tecnologias voltadas para o desenvolvimento dessa tecnologia, ainda há muito a se explorar nas aplicações das baterias de íons-lítio. Já existem veículos militares utilizando baterias de íons-lítio, mas as principais tendências nos novos usos destas baterias são sistemas não tripulados e *datacenters*. Ambos os sistemas são de bastante uso das Forças Armadas brasileiras. Em *datacenters* que utilizam baterias elétricas, há um enorme ganho de economia de energia e de recursos financeiros, em meio à necessidade de maior capacidade de processamento de informações. Diante da urgência cada vez maior de reduzir o consumo de energia e aumentar a eficiência energética dos *datacenters* militares, é imperativo que as três Forças Armadas brasileiras busquem alternativas tecnológicas sustentáveis, como baterias elétricas.

De todos os combustíveis sustentáveis considerados neste Estudo, o que menor apresenta grupos de pesquisa e laboratórios destinados ao desenvolvimento tecnológico no País é o de reatores nucleares. Embora, historicamente, o Brasil tenha atuado significativamente na área nuclear para fins pacíficos com foco na construção de diversas usinas nucleares, atualmente, somente existem duas usinas nucleares em operação e uma em construção. Existem reatores nucleares de pesquisa em operação em universidades brasileiras e projetos de construção de reatores nucleares para produção de radiofármacos, para propulsão naval e para a geração de

energia em áreas remotas. Há projetos também da Eletronuclear para extensão da vida útil da usina nuclear de Angra 1 e para a construção de novo depósito de rejeitos radioativos. Embora o mapeamento tenha apontado, neste Estudo, a existência de apenas sete grupos/laboratórios de pesquisa cadastrados no CNPq e/ou na PNIPE na área de reatores nucleares, os Laboratórios de Análise Neutrônica e Computacional de Reatores (LANCER) e o Laboratório de Instrumentação Nuclear (LIR), ambos vinculados à COPPE/UFRJ, não estão cadastrados na PNIPE. Da COPPE/UFRJ, consta apenas no mapeamento deste Estudo o Grupo do Tório, cuja linha de pesquisa que pode ser de interesse da Defesa é a de uso de tório em reatores nucleares e ciclo de combustível.

São destaques neste mapeamento grupos/laboratórios de pesquisa cadastrados no CNPq e/ou na PNIPE para a região Sul, na área de reatores nucleares, o Grupo de pesquisas Aplicações e Treinamento Nucleares (GNUM), vinculado à Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS); e para a região Norte, é o Grupo de Inteligência Computacional e Otimização, vinculado à Universidade Federal do Oeste do Pará (UFOPA). As linhas de pesquisa do GNUM/UFRGS que podem ser de interesse da Defesa são: a) instrumentação nuclear e b) reatores nucleares. A linha de pesquisa do grupo de Inteligência Computacional e Otimização da UFOPA que pode ser de interesse da Defesa é a de otimização dos padrões de carregamento de reatores nucleares.

Existem diversos outros grupos e laboratórios voltados para a área de reatores nucleares que não estão cadastrados nem no Diretório de Grupos do CNPq nem da PNIPE, mas que são de fundamental importância destacar neste estudo. Muitos destes grupos e laboratórios estão vinculados à Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), tais como os grupos e laboratórios do Instituto de Energia Nuclear (IEN) e do Centro de Desenvolvimento de Tecnologias Nucleares (CDTN). Existem também ICT militares que possuem grupos e laboratórios que desenvolvem pesquisas voltadas para reatores nucleares. Serão citadas aqui as ICT militares por Força Armada que estão desenvolvendo pesquisas nesta área tecnológica: na Marinha, há grupos e laboratórios de pesquisa no Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo (CTMSP) e na Diretoria de Desenvolvimento Nuclear da Marinha (DDNM). Importante ressaltar que, subordinado ao CTMSP, está o Centro Industrial Nuclear de Aramar (CINA), onde a Marinha do Brasil nacionaliza em laboratórios processos, peças e equipamentos necessários para a construção do reator e para a fabricação do combustível nuclear, no âmbito do Programa Nuclear da Marinha (PNM). No Exército Brasileiro, além de grupos e laboratórios de pesquisa, existe o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Nuclear do IME. Neste programa, as pesquisas se concentram em duas linhas: reatores nucleares e defesa radiológica e nuclear. Os grupos e laboratórios da FAB voltados para a área de reatores nucleares estão concentrados na Divisão de Energia Nuclear (ENU) do Instituto de Estudos Avançados (IEAV) da FAB. A ENU/IEAV investiga microrreatores nucleares com potência elétrica no intervalo de 0,1 a 1000 kW para aplicações terrestres em regiões isoladas ou aplicações espaciais, com confiabilidade e portabilidade elevadas, efeitos da radiação espacial na atmosfera terrestre e a interação e efeitos da radiação ionizante sobre indivíduos, materiais, componentes e sistemas expostos à radiação nas aplicações aeroespaciais.

“Plantas de hidrogênio verde têm sido incentivadas com diversas modalidades de financiamento e liberação de crédito no Brasil e no exterior; no entanto, há uma enorme capacidade ociosa de hidrogênio cinza e azul no Brasil, oriunda da reforma a vapor do gás natural.”

Enquanto o projeto de SMR da AMAZUL é um *spin off* do LABGENE, o projeto Terra está concentrado no IEAV/FAB. Haja vista que microrreatores nucleares são uma das principais tendências no mercado de reatores nucleares atualmente, é relevante que a FAB dê continuidade ao projeto e/ou transfira a tecnologia para a indústria. Além de receber os royalties, contribuirá com o fomento à indústria espacial nacional e a projeção do Brasil na nova corrida privada espacial.

Com relação ao hidrogênio, este Estudo aponta que a principal tendência na cadeia produtiva de hidrogênio é produzi-lo a partir de fontes renováveis, como energia solar e eólica. Plantas de hidrogênio verde têm sido incentivadas com diversas modalidades de financiamento e liberação de crédito no Brasil e no exterior; no entanto, há uma enorme capacidade ociosa de hidrogênio cinza e azul no Brasil, oriunda da reforma a vapor do gás natural. Importante que, em meio à guerra de narrativas pelo maior protagonismo internacional nas mudanças climáticas, em especial, incentivando a expansão de produção de hidrogênio verde, autoridades brasileiras incentivem mais o uso da capacidade já instalada no Brasil de hidrogênio azul e cinza do que fomentar o surgimento de novas plantas de hidrogênio. Haja vista a grande quantidade de parques de geração de energia eólica e solar no país, insumos estratégicos para a produção de hidrogênio verde, este Estudo sinaliza para um possível desperdício de recursos financeiros públicos, à medida que boa parte das UGH são oriundas de refinarias estatais de óleo e gás. Foram cerca de 70 anos de investimentos públicos para que a Petrobras se tornasse uma das empresas líderes mundiais na produção e derivados de óleo e gás, com vultosos investi-

mentos em CT&I. A infraestrutura científica, tecnológica e industrial que deu origem às UGH fazem parte deste vultoso investimento público.

É imperativo que o Brasil seja protagonista no processo de transição energética, considerando estes esforços e apresentando narrativa própria. Daí a reorientação sugerida neste Estudo: que o Brasil protagonize internacionalmente a contenção das mudanças climáticas, sustentando o argumento de energias de baixo carbono, por ser mais inclusivo e realista, do que o argumento em prol de energias renováveis, por ser restritivo e por desconsiderar o histórico, os investimentos públicos, o esforço produtivo nacional, a formação e a qualificação de talentos no setor.

Se o Brasil se envolver em uma eventual guerra no futuro e o setor produtivo comprovar que o hidrogênio, como elemento combustível, pode se configurar como uma surpresa estratégica, a origem da fonte do hidrogênio (verde, cinza, azul ou rosa) será insignificante para as Forças Armadas brasileiras.

Os principais desafios da segurança energética envolvem questões como intermitência, centralização da produção, má distribuição da energia e a descarbonização do setor. Embora o Brasil tenha abundância em insumos energéticos renováveis, como água, sol e ventos, a geração de energia elétrica só ocorre quando o insumo estiver disponível. Como analisado, o Brasil é um dos países que já apresentam uma das matrizes energéticas mais limpas do mundo. O principal insumo energético do Brasil é a água e a geração de energia é altamente dependente do regime de chuvas. Em períodos de baixa pluviométrica, os brasileiros sofrem com tarifas de consumo de energia mais altas e a ineficiência de políticas públicas. Com o agravamento das mudanças climáticas, a intermitência se tornou um desafio ainda maior para a segurança energética brasileira. Daí a necessidade de ainda maior diversificação das fontes energéticas, em especial, as energias de baixo carbono. A título de exemplo, hidrogênio azul e cinza produzidos a partir de capacidades instaladas em refinarias de petróleo podem também integrar o Sistema Interligado Nacional e aumentar a oferta de energia com tarifas mais reduzidas para os consumidores brasileiros.

A partir das usinas hidrelétricas dispersas em dezesseis bacias hidrográficas em diversas regiões do País, a energia elétrica é gerada e integrada ao Sistema Interligado Nacional. Demais usinas termoeletricas, também dispersas pelo País, como as de biocombustíveis, petroquímicas, as de carvão mineral e as nucleares, geram energia de forma complementar, também integrando o Sistema Interligado Nacional. As duas únicas usinas nucleares em operação no Brasil estão localizadas na cidade de Angra dos Reis, no estado do Rio de Janeiro, mas as UGH estão distribuídas em refinarias brasileiras de petróleo em todo o País. Neste sentido, a produção de energia no País é descentralizada; no entanto, ainda existem milhares de brasileiros sem acesso à energia. Há falta de infraestrutura adequada para distribuir e abranger todo o território nacional¹⁶.

“Com o agravamento das mudanças climáticas, a intermitência se tornou um desafio ainda maior para a segurança energética brasileira. Daí a necessidade de ainda maior diversificação das fontes energéticas, em especial, as energias de baixo carbono.”

Além de contribuir com sistemas de geração e de armazenamento de energia às comunidades locais isoladas, o Exército Brasileiro necessita de energia para conectar as suas próprias unidades na região Amazônica. Futuramente, conforme for a demanda por energia elétrica do Exército Brasileiro e do crescimento econômico local, módulos de geração de energia fotovoltaica instalados em unidades militares podem subsidiar a produção local de hidrogênio verde para alimentar sistemas e veículos da Força Terrestre em áreas mais remotas e de difícil acesso. Sistemas de armazenamento de energia que contam com baterias elétricas podem também gerar energia para sistemas não tripulados do Exército em missões na região amazônica.

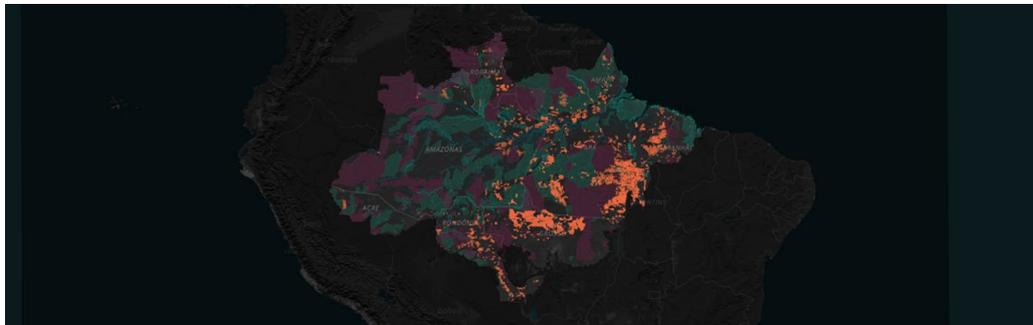
Interessante artigo publicado por Giorgio de Tomi, Giovanna Loredó e Vinicius Santos sobre “Minerais Críticos e Estratégicos no Brasil: Uma Agenda de Soberania e de Clima” no site do Centro Soberania e Clima¹⁷ destaca a relevância de debater o papel dos minerais considerados críticos na agenda ambiental das mudanças climáticas. Os minerais são críticos para o desenvolvimento, produção e armazenamento de tecnologias verdes consideradas indispensáveis e passíveis de alto risco de restrição na nova agenda ambiental global. Entre os minerais críticos, encontram-se urânio, alumínio, grafite, manganês, nióbio, prata, lítio, silício, níquel, cobre, cádmio, cobalto, terras raras, entre outros. Estes insumos são indispensáveis na cadeia produtiva de SMR, mi-

16. São as concessionárias de energia as responsáveis pela operação, manutenção e investimentos em infraestrutura elétrica. A regulação do setor elétrico é realizada pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

17. Acesse [aqui](#) a publicação completa.

correatores nucleares, turbinas eólicas, painéis solares e sistemas de armazenamento de energia. O Brasil é rico em muitos destes minerais críticos e muitos deles se encontram depositados em áreas consideradas estratégicas pela Defesa, tais como Amazônia e nas Águas Jurisdicionais Brasileiras (AJB). A figura 11 ilustra o mapa de minerais críticos depositados em reservas na Amazônia brasileira.

Figura 11. Minerais críticos na Amazônia

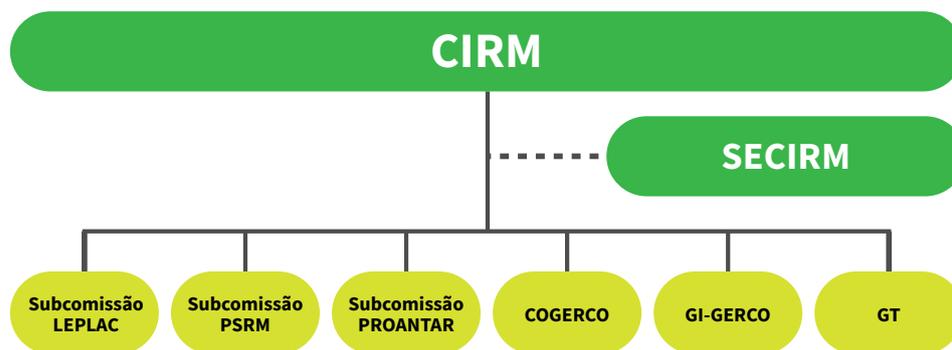


Fonte: InfoAmazônia, 2024

Em laranja, são as áreas em que há minerais críticos com requerimentos válidos na Agência Nacional de Mineração (ANM) até 24 de maio de 2024¹⁸. O InfoAmazônia mapeou ao menos dez minerais considerados essenciais na transição energética com requerimentos válidos na ANM, tais como alumínio, cobalto, cobre, grafite, lítio, manganês, nióbio, níquel, prata e terras raras. Em roxo, são as áreas da Amazônia brasileiras onde se encontram reservas indígenas delimitadas oficialmente pela Fundação Nacional do Índio (FUNAI). Em verde, com dados do Ministério do Meio Ambiente (MMA), encontram-se todas as Unidades de Conservação do bioma Amazônia (federais, estaduais e municipais)¹⁹.

Como é possível visualizar na figura 11, diversas reservas de minerais críticos estão localizadas em reservas indígenas. Estas reservas foram demarcadas pela Constituição Federal de 1988 como território indígena e são protegidas para a posse permanente e o usufruto exclusivo destes povos. Embora pertençam ao patrimônio da União, estas reservas são de posse permanentemente dos povos indígenas, tornando ilegal e criminosa a prática comercial da extração destes minerais por mineradoras e/ou garimpeiros nestas reservas. Disputas na região amazônica por extração de minerais críticos já existem há muitos anos tanto entre garimpeiros e povos indígenas, quanto entre as próprias comunidades indígenas. Além de praticar crimes contra a população indígena em áreas demarcadas, garimpeiros ilegais proliferam bebidas alcoólicas e armas de fogo em reservas indígenas, cooptam jovens para a extração de minerais e aumentam a violência entre comunidades (Agência Brasil, 2023).

Figura 12. Organograma da CIRM



Fonte: CIRM, 2024

Já no âmbito da Amazônia Azul, a Comissão Interministerial para os Recursos do Mar (CIRM) é órgão deliberativo e de assessoramento, criado em 12 de setembro de 1974 e reinstituído em 2019 pelo Decreto nº 9.858, de 25 de junho de 2019, com a finalidade de coordenar as ações relativas à Política Nacional para os Recursos do Mar

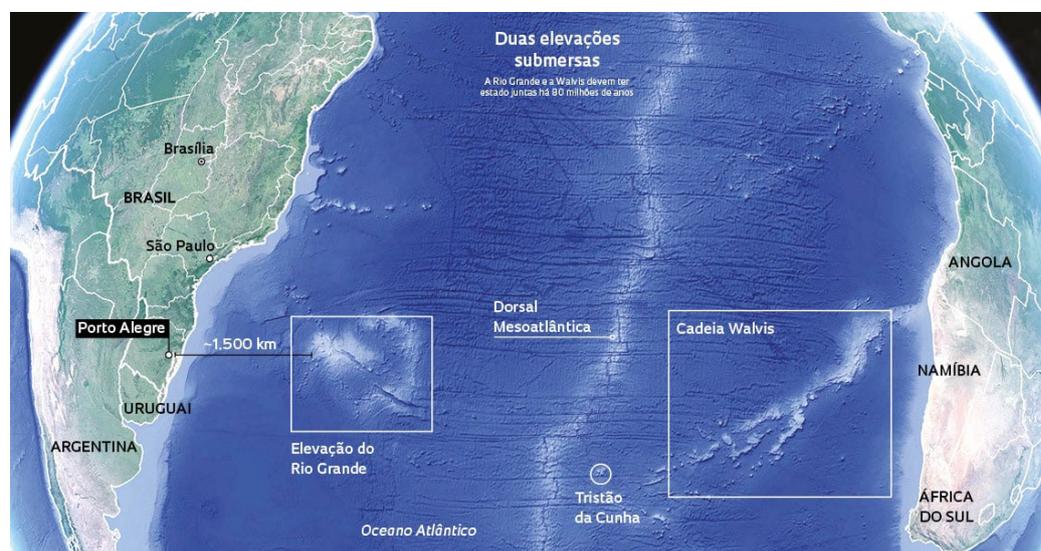
18. No mapa interativo ilustrado no InfoAmazônia, em laranja, é possível visualizar nos requerimentos as informações sobre a substância requerida, nome da mineradora solicitante, fase dos requerimentos, ano da solicitação, atualizações sobre movimentação e número do processo.

19. No mapa interativo ilustrado no InfoAmazônia, em verde, é possível visualizar o nome das Unidades de Conservação, o tamanho e o ano de criação.

(PNRM) e implementar o Programa Antártico Brasileiro (PROANTAR). O responsável por coordenar estas ações é o Comandante da Marinha, denominado Autoridade Marítima. Conforme figura 12, existem três subcomissões subordinadas à CIRM: a Subcomissão para o Plano de Levantamento da Plataforma Continental Brasileira, a Subcomissão para o Plano Setorial para os Recursos do Mar e a Subcomissão para o Programa Antártico Brasileiro.

A finalidade do LEPLAC é estabelecer o limite exterior da nossa Plataforma Continental Brasileira²⁰ no seu enfoque jurídico, na qual o Brasil exerce direitos de soberania para a exploração e o aproveitamento dos recursos naturais do leito e subsolo marinho. No âmbito do LEPLAC, além das 200 milhas marítimas, novas propostas brasileiras de revisão da margem continental foram submetidas à Comissão de Limites da ONU, entre elas: região sul, margem equatorial e margem oriental/meridional. A proposta da margem oriental/meridional com a inclusão da Elevação do Rio Grande (ERG) foi encaminhada à Comissão de Limites da ONU em 7 de dezembro de 2018 e ainda está em fase de análise. A ERG é um planalto submarino localizado em águas internacionais, distante cerca de 1.260 quilômetros do litoral brasileiro e com profundidades que oscilam entre 600 e quatro mil metros, no fundo do oceano Atlântico. A figura 13 ilustra a área da parte sul do oceano Atlântico onde está localizada a ERG:

Figura 13. Elevação do Rio Grande



Fonte: Fioravanti, 2019, p. 65

Com o aceite da inclusão destas novas três propostas à Comissão de Limites da ONU, a extensão do território brasileiro na denominada Amazônia Azul será de cerca de 5,7 milhões de km² de área.

Em 16 de setembro de 2009, por meio da Resolução nº 003 da CIRM, criou-se o Programa de Prospecção e Exploração de Recursos Minerais da Área Internacional do Atlântico Sul e Equatorial (PROAREA) com o objetivo de mapear a ocorrência de minerais na ERG, em especial, depósitos marinhos de crostas ferromanganesíferas ricas em cobalto, obter informações que contribuíssem para desvendar a evolução geológica e paleoceanográfica da ERG e desenvolver projetos de pesquisas relacionados aos sulfetos polimetálicos na Cordilheira Meso-Atlântica. Diversos navios da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) da Marinha do Brasil e navios fretados foram utilizados por comissões de pesquisas no âmbito do PROAREA para realizar expedições científicas na ERG.

Desde a criação do PROAREA, foram realizadas inúmeras expedições científicas na ERG, por meio de diversas comissões de pesquisas, utilizando veículos autônomos submarinos. Além de depósitos de crosta ferromanganesíferas ricas em cobalto, foram encontrados na ERG por expedições de pesquisadores da Universidade de São Paulo (USP), com financiamento da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) na região, por meio de georreferenciamento realizado por veículo autônomo marinho, lítio e telúrio (FAPESP, 2023).

Em abril de 2023, um navio fretado de um instituto de pesquisa alemão foi flagrado realizando pesquisas no subsolo marinho na ERG em AJB. A Marinha do Brasil enviou uma fragata até o local e ordenou à tripulação alemã que suspendesse a expedição e se retirasse das AJB (Padilha, 2023). Em cenários futuros, diversas disputas

20. Para mais informações sobre a Plataforma Continental Brasileira, acesse [aqui](#).

nacionais e internacionais por minerais críticos podem ocorrer tanto na Amazônia quanto na Amazônia Azul. Importante que governo brasileiro combata ilícitos e crimes nestas regiões a fim de conter conflitos armados de maior escala na região amazônica, apoie a criação e/ou fortaleça organizações de segurança e defesa com foco nestas regiões, como a extinta União de Nações Sul-Americanas (UNASUL), crie organizações e programas que visem a exploração comercial nestas regiões, tais como o PROAREA, o Programa de Avaliação da Potencialidade Mineral da Plataforma Continental Jurídica Brasileira (REMLAC) e a Zona de Paz e Cooperação do Atlântico Sul (ZOPACAS). Fomentar o desenvolvimento de projetos e negócios que explorem comercialmente minerais críticos, de forma segura e regulamentada, é crucial para viabilizar a cadeia produtiva de tecnologias verdes em benefício da sociedade brasileira e, em especial, das comunidades diretamente envolvidas na atividade mineradora. Ações estratégicas como estas aumentam a presença brasileira em áreas estratégicas aos interesses nacionais, reduzem a probabilidade de cenários futuros em que ocorrerão conflitos armados de maior escala nestas regiões e garantem o crescimento sustentável da economia brasileira.

O Brasil possui uma das maiores jazidas de urânio do mundo e possui milhares de litros de rejeitos radioativos estocados em depósitos armazenados na CNAEA. Como mencionado, o Brasil não reprocessa urânio por decisão política interna. No entanto, tem capacidade ociosa de material crítico radioativo, como plutônio, para geração de energia por decaimento para diversos fins civis. Há uma frente econômica não explorada comercialmente na área nuclear no Brasil que pode ser fomentada pelo MD e pela Agência Espacial Brasileira (AEB) para atividades de exploração espacial, por exemplo.

Se por um lado, a mineração é uma das atividades que mais contribuem com impactos ambientais negativos, por outro, sem a mineração não há desenvolvimento de sistemas e tecnologias verdes. A exploração e o beneficiamento de lítio, por exemplo, podem contribuir para a degradação do solo e para a contaminação de águas subterrâneas. A exploração e o beneficiamento do urânio podem gerar impactos radiológicos e contaminações no solo, na água e no ar. Enquanto existem órgãos de regulamentação, fiscalização e controle de rejeitos nucleares, todos os anos milhões de resíduos tóxicos, como chumbo, cromo e cádmio, oriundos do descarte de painéis solares, sem qualquer regulamentação, fiscalização ou controle, contaminam pessoas, solo, água e ar. É imperativo que cada vez mais empresas mineradoras adotem práticas e tecnologias mais sustentáveis para minimizar os impactos no meio ambiente.

Argumentos depreciativos, muitas vezes oriundos de *lobbys* de combustíveis fósseis, não se sustentam diante dos benefícios que são gerados pelos sistemas e tecnologias verdes em meio às mudanças climáticas. Novas tecnologias sempre tendem a ser questionadas pela opinião pública. Daí a importância da comunidade científica e tecnológica e do setor empresarial testarem-nas exaustivamente até que possam se consolidar na economia global.

Importante que o MD apoie a criação de programas de conscientização e de mudança de mentalidade junto ao MME, à medida que projetos das Forças Armadas brasileiras também se beneficiam da exploração e do beneficiamento de minerais críticos. O Brasil é privilegiado naturalmente por deter reservas economicamente viáveis de todos estes minerais críticos citados. No entanto, com o crescimento da demanda econômica por tecnologias verdes em meio à urgência das mudanças climáticas, a insuficiência de reservas destes insumos para atender tantas demandas de diversos setores econômicos brasileiros pode comprometer e até interromper o desenvolvimento de programas e de projetos considerados estratégicos pelas Forças Armadas brasileiras.

A Embraer, por exemplo, realiza a gestão de materiais críticos na cadeia de suprimentos identificando os seus fornecedores críticos por meio de duas matrizes: uma estratégica e outra de risco. Na matriz estratégica, os fornecedores são classificados de acordo com a complexidade dos produtos e serviços que prestam à empresa e pelo gasto total ao longo da vida do contrato. A Embraer combina essas informações com o nível de impacto nos negócios da empresa e os demais fornecedores críticos e estratégicos identificados. Na matriz de risco, um quadro bidimensional que melhor estima a vulnerabilidade do fornecedor versus o impacto nos negócios da Embraer é criado e, a partir daí, a empresa pode identificar os fornecedores críticos que exigirão maior controle (EMBRAER, 2022).

Vendas e Operações (S&OP, na sigla em inglês) direcionam as estratégias de abastecimento para mitigar a escassez de materiais críticos e conduzem um Programa de Gestão de Fornecedores (F4G) baseado em quatro pilares: 1) performance; 2) custo & eficiência; 3) crescimento do negócio; e 4) parceria. Após identificar quais

“Fomentar o desenvolvimento de projetos e negócios que explorem comercialmente minerais críticos, de forma segura e regulamentada, é crucial para viabilizar a cadeia produtiva de tecnologias verdes em benefício da sociedade brasileira e, em especial, das comunidades diretamente envolvidas na atividade mineradora.”

são os seus materiais críticos, a Embraer compartilha o planejamento de longo prazo com os seus fornecedores para mitigar a falta destes materiais na linha de produção²¹. O modelo de gestão de materiais críticos na cadeia de suprimentos da Embraer pode ser reproduzido na cadeia de suprimento das demais empresas da BID para que não falte ou sejam encontradas soluções em tempo hábil para mitigar a falta destes minerais e materiais críticos e estratégicos na cadeia produtiva de Defesa (EMBRAER, 2022).

As operações militares e a BID também serão impactadas pelas mudanças climáticas, o que exigirá maior engajamento político do MD para superar eventuais riscos relacionados a: resiliência das infraestruturas, falta de insumos estratégicos, dificuldade de acesso a materiais, aumento da sustentabilidade na cadeia produtiva, maior proteção à saúde de combatentes brasileiros e fomento à ampliação do desenvolvimento tecnológico de emprego dual.

Diante deste Estudo, é possível apontar que tecnologias verdes como HEFA, FAME, diesel verde, baterias de lítio-ar, SMR, microrreatores e hidrogênio verde são combustíveis sustentáveis com potencial interesse da Defesa porque preenchem os critérios e requisitos para aumentar a eficiência energética dos meios militares e aumentar as capacidades de Defesa das Forças Armadas nos teatros operacionais.

Embora “energias renováveis” seja uma área tecnológica de interesse da Defesa e as Forças Armadas brasileiras tenham interesse e/ou desenvolvem projetos tecnológicos nesta área, é imprescindível que o MD esteja mais engajado na temática, à medida que tanto as operações militares, quanto a cadeia produtiva da BID têm sido impactadas política, econômica, tecnológica e militarmente pelos desafios impostos pela mudança do clima. Da mesma maneira que o DOD americano criou um setor específico e uma ferramenta de avaliação climática (CAT, na sigla em inglês), é importante que o MD crie um setor específico que acompanhe a evolução e os transbordamentos desta temática e que fomenta a instrumentalização de uma ferramenta de avaliação climática para as Forças Armadas brasileiras.

“...é imprescindível que o MD esteja mais engajado na temática, à medida que tanto as operações militares, quanto a cadeia produtiva da BID têm sido impactadas política, econômica, tecnológica e militarmente pelos desafios impostos pela mudança do clima.”

Do ponto de vista da geopolítica climática, o Brasil reúne, portanto, as condições necessárias para liderar a narrativa da substituição dos combustíveis fósseis por combustíveis sustentáveis. Diferente da maior parte dos países em desenvolvimento, o Brasil tem condições de equilibrar o jogo político do sistema internacional, assumindo responsabilidades e arcando com os custos científicos, tecnológicos e industriais no desenvolvimento de tecnologias baseadas em fontes de baixo carbono. Nesse novo cenário, a Defesa brasileira tem muito a ganhar. ■

21. Para conhecer mais sobre o modelo de gestão de materiais críticos na cadeia de suprimentos da Embraer, acesse [aqui](#).



Referências bibliográficas

Agência Brasil (2023) Garimpo amplia conflitos entre povos yanomami. 14 de fevereiro. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/direitos-humanos/noticia/2023-02/garimpo-amplia-conflitos-entre-povos-yanomami>. (Acesso: 20 jul. 2024).

Agência Senado (2024) Aprovado marco legal para a produção do hidrogênio de baixo carbono. 19 de junho. Disponível em: [https://www12.senado.leg.br/noticias/materias/2024/06/19/aprovado-marco-legal-para-a-producao-do-hidrogenio-de-baixo-carbono#:~:text=O%20Plen%C3%A1rio%20do%20Senado%20aprovou,\(PL%202.308%2F2023\)](https://www12.senado.leg.br/noticias/materias/2024/06/19/aprovado-marco-legal-para-a-producao-do-hidrogenio-de-baixo-carbono#:~:text=O%20Plen%C3%A1rio%20do%20Senado%20aprovou,(PL%202.308%2F2023)). (Acesso: 26 ago. 2024).

Akademik Lomonosov (2022) Floating nuclear power plant (FNPP). Disponível em: <https://fnpp.info/about> (Acesso: 17 set. 2024).

Alvarez, G. (2023) New Technologies Can Stop Fossil Fuel's Financial Rollercoaster. But We Must Ensure Everyone Can Access Them. Forbes. 24 de maio. Disponível em: <https://www.forbes.com/sites/energyinnovation/2023/05/24/new-technologies-can-stop-fossil-fuels-financial-rollercoaster-but-we-must-ensure-everyone-can-access-them/?sh=166ab1565c84> (Acesso: 13 ago. 2024).

Arandanet (2020) Itaipu e Exército implantam sistema isolado solar na Amazônia. Arandanet, oito de outubro. Disponível em: <https://www.arandanet.com.br/revista/fotovolt/noticia/1077-Itaipu-e-Exercito-implantam-sistema-isolado-solar-na-Amazonia.html> (Acesso: 13 ago. 2024).

Balestieri, J. (2014) Geração de energia sustentável. São Paulo: Editora Unesp.

Barreiros, D. (2019) Projeções sobre o Futuro da Guerra: Tecnologias disruptivas e mudanças paradigmáticas (2020 – 2060). Texto para Discussão 025. Instituto de Economia, UFRJ. Disponível em: https://www.ie.ufrj.br/images/IE/TDS/2019/TD_IE_025_2019_BARREIROS.pdf (Acesso: 17 set. 2024).

Bento, J. (2022) Eletrodescarboxilação de ácidos graxos para produção de biocombustíveis. Programa de Pós-Graduação em Química, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal: UFRN. Disponível em: https://repositorio.ufrn.br/bitstream/123456789/48981/1/Eletrodescarboxilacaoacidosgraxos_Bento_2022.pdf. (Acesso: 20 jul. 2024).

Biodieselbr (2024) Associações estimam que B20 demandaria 90% da capacidade instalada do setor., 21 de fevereiro. Disponível em: <https://www.biodieselbr.com/noticias/associacoes-estimam-que-b20-demandaria-90-da-capacidade-instalada-do-setor-210224> (Acesso: 26 ago. 2024).

Brasil (2017) Defesa & Meio Ambiente – Preparo com sustentabilidade. Ministério da Defesa. Disponível em: <https://www.gov.br/defesa/pt-br/arquivos/asplan/defesa-meio-ambiente.pdf> (Acesso: 26 ago. 2024).

Brasil (2022a) Portaria GM-MD N° 5.890, de 5 de dezembro de 2022. Ministério da Defesa. Disponível em: / https://www.gov.br/defesa/pt-br/assuntos/industria-de-defesa/comissao-mista-da-industria-de-defesa-cmid-1/arquivos/portaria_gm_md_n_5.890_de_5_de_dezembro_de_2022.pdf (Acesso: 26 ago. 2024).

Brasil (2022b) Produção e Consumo de Hidrogênio em Refinarias no Brasil. Nota Técnica EPE/DPG/SDB/2022/01. Empresa de Pesquisa Energética, Ministério de Minas e Energia. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-667/NT-EPE-DPG-SDB-2022-01%20-%20Hidrog%C3%AAnio%20em%20Refinarias.pdf> (Acesso: 20 jul. 2024).

Brasil (2022c) Decreto nº 11.169, de 10 de agosto de 2022. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/decreto/D11169.htm (Acesso: 17 jan. 2025).

Brasil (2022d) Guia Do Planejamento Baseado Em Capacidades [PBC] Estado-Maior Conjunto das Forças Armadas, Ministério da Defesa. 1a Edição [versão preliminar].

Brasil (2023a) Projeto de Lei Nº 4.516. Disponível em: https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/prop_mostrarintegra?codteor=2343636 (Acesso: 26 ago. 2024).

Brasil (2023b) Programa Nacional do Hidrogênio - Plano de trabalho trienal 2023-2025. Ministério de Minas e Energia. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/PlanodeTrabalhoTrienalPNH2.pdf> (Acesso: 17 set. 2024).

Brasil (2023c) Relatório do subcomitê combustíveis marítimos - Combustíveis do Futuro. Conselho Nacional de Política Energética (CNPE). Disponível em: https://www.gov.br/mme/pt-br/programa-combustivel-do-futuro/relatorio_subcomite_combustiveis_maritimos.pdf/view (Acesso: 13 ago. 2024).

Brasil (2023d) Brasil exporta a primeira remessa de lítio verde. Ministério de Minas e Energia, 27 de julho. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/brasil-exporta-a-primeira-remessa-de-litio-verde> (Acesso: 17 set. 2024).

Borile, G. e Calgaro, C. (2019) Geopolítica ambiental e a dimensão internacional da proteção do meio ambiente. Revista Culturas Jurídicas, Vol. 6, Núm. 13, jan./abr. Disponível em <https://periodicos.uff.br/culturasjuridicas/article/download/45014/28963/151797>. (Acesso: 20 jul. 2024).

Campello, M. (2013) A Questão Ambiental e a Nova Geopolítica das Nações: Impactos e Pressões sobre a Amazônia Brasileira. Espaço Aberto, PPGG - UFRJ, V. 3, N.2. Disponível em <https://revistas.ufrj.br/index.php/EspacoAberto/article/view/2119/1885> (Acesso: 13 ago. 2024).

Cerne (2000) Estudo de Vida Útil Econômica e Taxa de Depreciação. Vol. 2/2. Escola Federal de Engenharia de Itajubá/CERNE - Centro de Estudos em Recursos Naturais e Energia. Disponível em: https://antigo.aneel.gov.br/mwg-internal/de5fs23hu73ds/progress?id=TWnsYdNt59FLUUyj_yT-dvM1NAHo200b5cGX-ASQb_o,&d (Acesso: 13 ago. 2024).

Comissão Europeia (2022) Building a European Research Area for clean hydrogen - the role of EU research and innovation investments to deliver on the EU's Hydrogen Strategy. Commission Staff Working Document. Bruxelas, 20 de janeiro. Disponível em: https://research-and-innovation.ec.europa.eu/document/download/e27c2819-ad54-4351-aa2e-7537f0357ee8_en?filename=ec_rtd_swd-era-clean-hydrogen.pdf (Acesso: 16 nov. 2024).

Corrêa, F. (2021a) Baterias substituíveis em sistemas elétricos e eletrônicos na guerra do futuro. DefesaNet, 26 de agosto. Disponível em: <https://www.defesonet.com.br/defesa/baterias-substituiveis-em-sistemas-eletricos-e-eletronicos-na-guerra-do-futuro/>. (Acesso: 20 jul. 2024).

Corrêa, F. (2021b) Sistemas de Navegação por Satélite e a Guerra do Futuro: uma abordagem prospectiva. Revista Análise Estratégica. Vol.19 (1), Dez 2020/Fev2021. Disponível em: <http://www.ebrevistas.eb.mil.br/CEEEAE/article/view/7732/6701> (Acesso: 13 ago. 2024).

Da Silva, C. T. (2021) Aplicações das baterias de lítio – Data Centers e Smart Grids. Embarcados. 20 de julho. Disponível em: <https://embarcados.com.br/baterias-de-litio-data-centers-e-smart-grids/> (Acesso: 13 ago. 2024).

EBC (2023) Mistura de biodiesel ao diesel passa a ser de 12% a partir de abril, 17 de março. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2023-03/mistura-de-biodiesel-ao-diesel-passa-ser-de-12-partir-de-abril> (Acesso: 26 ago. 2024).

EMBRAER (2022) Relatório Anual de Sustentabilidade. Disponível em: <https://esg.embraer.com/br/pt/assets/Embraer-Relatorio-Anual-de-Sustentabilidade-2022.pdf> (Acesso: 03 dez. 2024).

Estados Unidos [EUA] (2021) Climate Adaptation Plan. Department of Defense. Disponível em: <https://media.defense.gov/2021/Oct/07/2002869699/-1/-1/0/DEPARTMENT-OF-DEFENSE-CLIMATE-ADAPTATION-PLAN-2.PDF> (Acesso: 26 ago. 2024).

Estados Unidos [EUA] (2022) Climate Adaptation Plan 2022 Progress Report. Department of Defense, 2022. Disponível em: <https://www.sustainability.gov/pdfs/hhs-2022-cap.pdf>. (Acesso: 20 jul. 2024).

Estados Unidos [EUA] (2023) Climate Assessment Tool. U.S. Department of Defense. Disponível em: <https://media.defense.gov/2021/Apr/05/2002614579/-1/-1/0/DOD-CLIMATE-ASSESSMENT-TOOL.PDF> (Acesso: 26 ago. 2024).

Estenssoro, F. e Bustamante, J. P. (2022) La geopolítica ambiental de Estados Unidos y sus aliados del norte global: implicancias para América Latina/ Mónica Bruckmann 1a ed. - Ciudad Autónoma de Buenos Aires: CLACSO: Rio Grande do Sul: UNIJUÍ.

Fairfield Market Research (2023) Small Modular Reactor (SMR) Market. Disponível em: <https://www.fairfieldmarketresearch.com/report/small-modular-reactor-smr-market> (Acesso: 17 set. 2024).

FAPESP (2023) Estudo revela que Elevação do Rio Grande era gigantesca ilha tropical próxima ao Brasil e rica em minério. 17 de novembro. Disponível em: <https://agencia.fapesp.br/estudo-revela-que-elevacao-do-rio-grande-era-gigantesca-ilha-tropical-proxima-ao-brasil-e-rica-em-minerio/50249>. (Acesso: 20 jul. 2024).

Feltz, B. (2019) A mudança climática: questões filosóficas e éticas. O Correio da UNESCO, julho-setembro. Disponível em: https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000370032_por (Acesso: 26 ago. 2024).

Fioravanti, C. (2019) Revelações de um arquipélago submerso: praias, rios e manguezais cobriam cadeia montanhosa que estava acima do nível do mar há 40 milhões de anos. Revista Pesquisa FAPESP. Edição 282/agosto. Disponível em: https://revistapesquisa.fapesp.br/wp-content/uploads/2019/08/062-065_Oceanografia_282NOVO.pdf (Acesso: 17 set. 2024).

Fisher, M. (2017) Next generation reactors: safe and economical tools for sustainable energy. IAEA Bulletin, November 2017. Disponível em: <https://www.iaea.org/sites/default/files/publications/magazines/bulletin/bull58-4/5841819.pdf> (Acesso: 13 ago. 2024).

Fan, R. (2023) Segundo o Almirante Marcos Sampaio Olsen, a redução de recursos financeiros compromete a segurança nacional, e aproximadamente 40% das embarcações serão retiradas de serviço. DefesaNet, 30 de outubro. Disponível em: <https://www.defesanet.com.br/naval/segundo-o-almirante-marcos-sampaio-olsen-a-reducao-de-recursos-financeiros-compromete-a-seguranca-nacional-e-aproximadamente-40-das-embarcacoes-serao-retiradas-de-servico/>. (Acesso: 20 jul. 2024).

Galante, A. (2019) ThyssenKrupp Marine Systems lança sistema AIP de célula de combustível de quarta geração. Poder Naval, 7 de Setembro. Disponível em: <https://www.naval.com.br/blog/2019/09/07/thyssenkrupp-marine-systems-lanca-sistema-aip-de-celula-de-combustivel-de-quarta-geracao/> (Acesso: 26 ago. 2024).

Gerverni, M. e Irwin, S. (2023) Biodiesel and Renewable Diesel: What's the Difference? *armdoc daily* (13):22, Department of Agricultural and Consumer Economics, University of Illinois at Urbana-Champaign, 8 de fevereiro. Disponível em: <https://farmdocdaily.illinois.edu/2023/02/biodiesel-and-renewable-diesel-whats-the-difference.html> (Acesso: 13 ago. 2024).

Gomes, M. (2023) Segurança e proteção de um reator nuclear: uma breve revisão de seus parâmetros e características. *e-Boletim de Física*. International Centre for Physics Instituto de Física, Universidade de Brasília, ano 02. Disponível em: <https://periodicos.unb.br/index.php/e-bfis/article/view/47904/36736> (Acesso: 26 ago. 2024).

Guimarães, L. (2019) TERRA Project Update - A Brazilian Nuclear Space Microreactor Development. International Nuclear Atlantic Conference – INAC 2019. 23 de outubro. Disponível em: <https://www.aben.com.br/Arquivos/670/670.pdf> (Acesso: 03 dez. 2024).

Harlow, J. (2023) Why the US military should build modular nuclear reactors. *Defense News*, 16 de março. Disponível em: <https://www.defensenews.com/opinion/commentary/2023/03/16/why-the-us-military-should-build-modular-nuclear-reactors/> (Acesso: 13 ago. 2024).

Hora e Silva, M. E. (2015) Os combustíveis marítimos e o impacto ambiental. CIAGA/Marinha do Brasil. Disponível em <https://www.redebim.dphdm.mar.mil.br/vinculos/000009/000009c6.pdf> (Acesso: 17 set. 2024).

Hsiang, E. (2023) Fossil Fuel Financing and the Russia-Ukraine War. *Harvard International Review*, 28 de agosto. Disponível em: <https://hir.harvard.edu/fossil-fuel-financing-and-the-russia-ukraine-war/>. (Acesso: 20 jul. 2024).

Instituto Igarapé (2022) The greater horn on the edge: visualizing climate stress and insecurity. Disponível em: <https://igarape.org.br/wp-content/uploads/2022/01/The-Greater-Horn-on-the-Edge.pdf>. (Acesso: 20 jul. 2024).

IRENA (2022) Enabling Measures Roadmap for Green Hydrogen. Disponível em: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Jul/IRENA_Green_hydrogen_strategy_design_2024.pdf (Acesso: 16 nov. 2024).

Lopes, A. (2013) Propriedades termofísicas do biodiesel: Medição da velocidade ultrassônica e respectiva correlação com o número de cetano. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra. Disponível em: <https://estudogeral.uc.pt/bitstream/10316/41506/1/Disserta%C3%A7%C3%A3o%20de%20Mestrado%20-%20Andr%C3%A9%20Filipe%20Gouveia%20Lopes%202006111429%20-%20Propriedades%20termof%C3%ADsicas%20do%20bi.pdf> (Acesso: 26 ago. 2024).

Lopez, T. (2013) DOD Makes Climate Assessment Tool Available to Partner Nations. U.S. Department of Defense, 21 de abril. Disponível em: <https://www.defense.gov/News/News-Stories/Article/Article/3370578/dod-makes-climate-assessment-tool-available-to-partner-nations/>. (Acesso: 20 jul. 2024).

Liou, J. (2023) What are Small Modular Reactors (SMRs)? Office of Public Information and Communication/ AIEA. 13 de setembro. Disponível em: <https://www.iaea.org/newscenter/news/what-are-small-modular-reactors-smrs> (Acesso: 13 ago. 2024).

Macedo, P. (2015) Teoria da Surpresa? Contributo para um Debate. *ResPublica* 15/2015. Disponível em: <https://recil.ensinolosofona.pt/bitstream/10437/9592/1/Teoria%20da%20Surpresa.pdf> (Acesso: 13 ago. 2024).

MapBiomás Amazônia (2024) Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa do Observatório do Clima (SEEG/OC). Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/2024/10/03/mais-de-90-do-desmatamento-da-amazonia-e-para-abertura-de-pastagem/> (Acesso: 15 nov. 2024).

Martins, M. e Pianovski, D. (2013) A dimensão geopolítica da questão ambiental. *Revista Eletrônica Pro-Docência/ UEL*. Edição N° 5, V. 1, julho-dezembro. Disponível em: <https://www.uel.br/revistas/prodocenciafope/pages/arquivos/Volume5/3.%20PIANOVSK%20e%20MARTINS.pdf>. (Acesso: 20 jul. 2024).

Mata, J., Mesquita, A. e Vasconcelos, V. (2015) Estudos científicos para controle, segurança e licenciamento de centrais nucleares. Revista Internacional de Ciencia y Sociedad. Nº 2. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Jonatas-Mata/publication/369708945_Estudos_cientificos_para_controle_seguranca_e_licenciamento_de_centrais_nucleares/links/6428d10666f8522c38ed5ae6/Estudos-cientificos-para-controle-seguranca-e-licenciamento-de-centrais-nucleares.pdf. (Acesso: 20 jul. 2024).

Nuclear Energy Agency [NEA] (2023) COP28 recognises the critical role of nuclear energy for reducing the effects of climate change. Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). Disponível em: https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_89153/cop28-recognises-the-critical-role-of-nuclear-energy-for-reducing-the-effects-of-climate-change (Acesso: 20 jul. 2024).

Nunes, P. (2020) Gerenciamento de surpresas estratégicas baseado em sistemas conceituais: detectando ameaças e oportunidades a partir de sinais fracos da Web. Tese de Doutorado, Faculdade de Tecnologia, Universidade Estadual de Campinas. Disponível em: <https://repositorio.unicamp.br/Busca/Download?codigoArquivo=548289> (Acesso: 26 ago. 2024).

Oliveira, R. (2022a) Panorama do hidrogênio no Brasil. Texto para discussão / Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. Brasília: Rio de Janeiro: Ipea. Disponível em: https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/11291/1/td_2787_web.pdf. (Acesso: 20 jul. 2024).

Oliveira, Y. (2022b) Desafios do Mercado de Carbono após o Acordo de Paris: Uma revisão. Meio Ambiente (Brasil), v.4, n.1. 002-020. Disponível em: <https://meioambientebrasil.com.br/index.php/MABRA/article/view/167> (Acesso: 13 ago. 2024).

Organização das Nações Unidas [ONU] (2023) Como a ação climática está mudando a opinião sobre a função da energia nuclear. ONU News, 24 de fevereiro. Disponível em: <https://news.un.org/pt/story/2023/02/1810392>. (Acesso: 20 jul. 2024).

Organização do Tratado de Cooperação Amazônica [OTCA] (2010) Agenda Estratégica de Cooperação Amazônica. X Reunião de Ministros de Relações Exteriores do TCA - Secretaria Permanente. Disponível em: https://apps.oraotca.org/aro/documentos/files/agenda_estrategica_amazonica_pt.pdf?token=dGVzdGNsaWVudDp0ZXN0c2VjcmV0 (Acesso: 17 set. 2024).

Organização do Tratado do Atlântico Norte [OTAN] (2024) NATO Climate Change and Security Impact Assessment. The Secretary General's Report. Third Edition. Disponível em: https://www.nato.int/nato_static_fl2014/assets/pdf/2024/7/pdf/240709-Climat-Security-Impact.pdf (Acesso: 03 dez. 2024).

Padilha, L. (2023) Comandante da Marinha classifica navio alemão flagrado na costa de SC como ameaça ao Brasil. Defesa Aerea & Naval, 20 de maio. Disponível em: <https://www.defesaaereanaval.com.br/naval/comandante-da-marinha-classifica-navio-alemao-flagrado-na-costa-de-sc-como-ameaca-ao-brasil> (Acesso: 13 ago. 2024).

Paul Scherrer Institute (2021) 'Effectively removing CO2 from the atmosphere', PSI Stories, 12 de setembro. Disponível em: <https://www.psi.ch/en/news/psi-stories/effectively-removing-co2-from-the-atmosphere> (Acesso: 18 set. 2024).

Peixer, J. (2019) A contribuição nacionalmente determinada do Brasil para cumprimento do acordo de Paris: metas e perspectivas futuras. Tese de Doutorado, o Programa de Pós-Graduação em Direito, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/199009/PDPC1446-T.pdf?sequence=-1&isAllowed=y> (Acesso: 26 ago. 2024).

Pereira, S. (2021) Uso da RenovaCalc para avaliação da intensidade de carbono na produção de QAV-alternativo HEFA considerando diversas rotas de obtenção de hidrogênio. Curso em Engenharia de Bioprocessos, Rio de Janeiro: UFRJ/EQ. Disponível em: <https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/15814/1/SLSPereira.pdf>. (Acesso: 20 jul. 2024).

Porter, M (2004) Estratégia competitiva: técnicas para análise de indústrias e da concorrência. Rio de Janeiro: Elsevier.

Prauchner, M. J. et al. (2023) Combustíveis Hidrocarbônicos Alternativos, com Ênfase para os Combustíveis Sustentáveis para Aviação. Revista Virtual de Química.1-21. Disponível em: <http://static.sites.s bq.org.br/rvq.s bq.org.br/pdf/RVq220822-a1.pdf>. (Acesso: 20 jul. 2024).

Rached, G. e Sá, R. (2022) Cenários contemporâneos no âmbito da governança global: alternativas para o meio ambiente e a plataforma da sustentabilidade. São Paulo: Pimenta Cultural.

Reino Unido (2024) Defence: sustainability as a competitive advantage. Defence Science and Technology Laboratory Corporate Report. Disponível em: <https://www.gov.uk/government/publications/defence-sustainability-as-a-competitive-advantage> (Acesso: 03 dez. 2024).

Ribeiro, F. (2021) Você sabe quanto combustível um tanque de guerra gasta? Canaltech, 10 de agosto. Disponível em: <https://canaltech.com.br/veiculos/voce-sabe-quanto-combustivel-gasta-um-tanque-de-guerra-192285/>. (Acesso: 26 ago. 2024).

Rodrigues, E. (2018) A política nacional de biocombustíveis e os ganhos de eficiência no setor produtivo. Boletim Energético. FGV Energia. Disponível em: https://bibliotecadigital.fgv.br/mwg-internal/de5fs23hu73ds/progress?id=xBdxUy94QCOqwaluP1oN-L4dpKW_Pn9saioLDiZvn6k. (Acesso: 26 ago. 2024).

Rosa, B. (2024) Transição energética impulsiona investimento na mineração. O Globo, 19 de setembro. Disponível em: <https://oglobo.globo.com/economia/noticia/2024/09/19/transicao-energetica-impulsiona-investimento-na-mineracao.ghtml> (Acesso: 03 dez. 2024).

Santos, N. (2022) Qual o futuro do hidrogênio na Marinha? Departamento de Estudos Pós-Graduados, Instituto Universitário Militar. Pedrouços, 2022. Disponível em: <https://comum.rcaap.pt/handle/10400.26/39803> (Acesso: 13 ago. 2024).

Silveira, A. (2024) Mais energia nuclear para garantir a transição energética. Exame, 25 de novembro. Disponível em: <https://exame.com/economia/mais-energia-nuclear-para-garantir-a-transicao-energetica/> (Acesso: 03 dez. 2024).

Soares, F., Madeira, J. e Clara, M. (2019) Análise energética de uma usina nuclear com reator BWR e estudo comparativo com a usina nuclear Angra 2 do modelo PWR. Revista Brasileira de Energia, Vol. 25, Nº 1, 1º Trimestre de 2019. Disponível em: <https://sbpe.org.br/index.php/rbe/article/view/422/412> (Acesso: 13 ago. 2024).

Terlouw, T., Bauer, C., Rosa, L. and Mazzotti, M. (2021) 'Life cycle assessment of carbon dioxide removal technologies: a critical review', Energy & Environmental Science, 14, pp. 1701-1721. DOI: 10.1039/D0EE03757E.

União Europeia [UE] (2022) Building a European Research Area for clean hydrogen - the role of EU research and innovation investments to deliver on the EU's Hydrogen Strategy. Commission Staff Working Document. European Commission. Bruxelas, 20 de janeiro. Disponível em: https://research-and-innovation.ec.europa.eu/system/files/2022-01/ec_rtd_swd-era-clean-hydrogen.pdf (Acesso: 13 ago. 2024).

United Nations Office on Drugs and Crime [UNODC] (2023) The Nexus Between Drugs and Crimes that Affect the Environment and Convergent Crime in the Amazon Basin. World Drug Report - Booklet 4. Disponível em: https://www.unodc.org/res/WDR-2023/WDR23_B3_CH4_Amazon.pdf (Acesso: 15 nov. 2024).

UOL (2022) Snipers poderão usar moto elétrica contra russos na Guerra da Ucrânia. UOL, 12 de maio. Disponível em <https://autopapo.uol.com.br/motos/moto-eletrica-guerra-ucrania/> (Acesso: 13 ago. 2024).

Vogt, R. (2018) Baterias de submarinos. Revista Marítima Brasileira, 3º Trimestre de 2018. Disponível em: <https://portaldeperiodicos.marinha.mil.br/index.php/revistamaritima/article/download/246/232/>. (Acesso: 26 ago. 2024).

Walt, S. M. (2019) 'Who Will Save the Amazon (and How)?' *Foreign Policy*, 5 de agosto. Disponível em: <https://foreignpolicy.com/2019/08/05/who-will-invade-brazil-to-save-the-amazon/> (Acesso: 03 dez. 2024).



Soberania
& Clima