

Resiliência Energética Militar em Microrredes Táticas: uma Aplicação do *Strategic Choice Approach*

Luiz Pereira da Silva Neto¹, Lamartine Nogueira Frutuoso Guimarães¹ e Mischel Carmen Neyra Belderrain¹

¹Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos/SP – Brasil

Resumo – A disponibilidade energética é fator crítico para a continuidade da missão em ambientes hostis e com logística contestada. Este artigo aplica qualitativamente o *Strategic Choice Approach* (SCA) à estruturação do problema de resiliência energética militar em microrredes táticas. O estudo considera a seleção de arquiteturas energéticas para uma tropa em campanha operando de forma isolada, sem apoio logístico externo. Foram analisadas combinações envolvendo geradores a diesel, energia solar com armazenamento, sistemas híbridos, tipos de carga, distribuição dos ativos energéticos e formas de gerenciamento. As alternativas viáveis foram comparadas qualitativamente segundo resiliência operacional, robustez logístico-física, robustez cibernética, furtividade operacional e facilidade de operação. Os resultados indicam que arquiteturas híbridas com gerenciamento automatizado apresentam maior equilíbrio geral, embora demandem maior atenção à complexidade operacional e à proteção ciberfísica. O SCA mostrou-se útil para organizar alternativas, explicitar incertezas e formular pacotes de compromisso, apoiando decisões graduais e adaptativas alinhadas ao cenário operacional.

Palavras-Chave – Resiliência energética, Microrredes militares, *Strategic Choice Approach*.

I. INTRODUÇÃO

A energia é um requisito central para o desempenho militar, pois sustenta capacidades essenciais à missão, à prontidão e à vantagem operacional [1]. O contexto atual levou à sofisticação dos sistemas militares e ao aumento da demanda energética das operações ao longo do tempo, à medida que sensores, comunicações avançadas, visão noturna, drones e sistemas robotizados passaram a integrar o ambiente de combate [2]. Essa conjuntura e a multiplicidade de atores e perspectivas fazem com que a resiliência energética militar se enquadre como problema complexo, nos termos de [3].

A provisão de energia em destacamentos e bases remotas historicamente depende, prioritariamente, de geradores a diesel, sobretudo pela dificuldade de conexão com redes elétricas externas. Embora esses equipamentos ofereçam fornecimento firme e operação relativamente simples, sua dependência de reabastecimento contínuo impõe elevada exigência logística, amplia a exposição de comboios e infraestruturas energéticas e pode comprometer mobilidade, orçamento e liberdade de ação em ambientes remotos ou contestados [1][4]. Nesse contexto, microrredes híbridas, combinando geração convencional, fontes renováveis e sistemas de armazenamento, surgem como alternativa para ampliar a autonomia energética local e reduzir a dependência exclusiva de combustível fóssil [5].

Apesar desse avanço, a escolha da arquitetura energética militar mais adequada constitui-se como um problema multicritério estratégico e não apenas tecnológico. A comparação entre geradores a diesel, geração solar com baterias e sistemas híbridos envolve dimensões técnicas, logísticas, operacionais e de incerteza, exigindo meios de avaliação capazes de considerar disponibilidade, acessibilidade, custo, confiabilidade, autonomia, modularidade, exposição logística e cibernética, variabilidade da missão, desempenho ao longo do tempo e capacidade de gerenciamento do sistema [1][6][7][8].

Nessa perspectiva, o *Strategic Choice Approach* mostra-se adequado à estruturação do problema complexo de resiliência energética militar com múltiplos critérios e cenários concorrentes. Em vez de substituir modelos de otimização, simulação ou ranqueamento multicritério, o SCA contribui para organizar previamente alternativas, critérios, incertezas e prioridades que orientarão a comparação entre diferentes configurações energéticas [9].

II. REFERENCIAL TEÓRICO

No contexto operacional militar moderno, os geradores a diesel ainda são relevantes por sua capacidade de fornecimento firme, simplicidade de operação e ampla disponibilidade. Entretanto, esses sistemas tendem a ser sobredimensionados e ineficientes em muitas condições de operação, além de imporem vulnerabilidades logísticas significativas em ambientes remotos ou de logística contestada [4]. Em operações militares mais amplas, o transporte contínuo de combustível também aparece como risco de segurança e como fator que pode comprometer orçamento, mobilidade e liberdade de ação [1]. Esse cenário tem impulsionado a busca por alternativas mais sustentáveis e resilientes, capazes de equilibrar requisitos ambientais, logísticos e operacionais diante do aumento da demanda energética das instalações e operações militares [2].

Uma das formas promissoras de mitigação dessas vulnerabilidades é a inclusão de geração local por fontes renováveis com armazenamento, combinada aos geradores a diesel e integrada em uma microrrede. A transição gradual dos geradores a diesel para microrredes híbridas, que englobam armazenamento e geração solar otimizada, tem sido apontada como caminho para reduzir o consumo de combustível e o risco logístico, preservando a prontidão da missão [10].

O cenário militar também exige modularidade, interoperabilidade, mobilidade dos sistemas e redes elétricas, além de capacidade de operação em ambientes degradados, distribuídos e com elevada autonomia [11]. Nesse sentido, para que sistemas híbridos com fontes renováveis locais e armazenamento contribuam efetivamente para a resiliência

energética, é necessário compatibilizar desafios técnicos de engenharia com requisitos variáveis de prontidão militar [12].

No campo da otimização técnica, estudos voltados a locais remotos indicam que sistemas híbridos compostos por geração fotovoltaica, baterias e geradores podem reduzir o consumo de combustível entre 50% e 88% em comparação com soluções exclusivamente a diesel, desde que corretamente dimensionados [5][13]. Configurações capazes de garantir autonomia por semanas ou até meses também têm sido consideradas para aplicações militares, especialmente em contextos de maior isolamento ou restrição logística [14][15].

Como os problemas energéticos são multidimensionais, sua análise exige o tratamento simultâneo de critérios conflitantes. Isso explica a ampla adoção de métodos como AHP, TOPSIS, VIKOR, PROMETHEE e modelos híbridos em problemas de decisão no setor energético [16]. Entretanto, antes da aplicação de abordagens de Pesquisa Operacional *Hard*, é adequada uma etapa de estruturação do problema, capaz de explicitar vulnerabilidades, forças, fraquezas e prioridades de intervenção [17]. Essa etapa também permite incorporar dimensões como disponibilidade, acessibilidade, confiabilidade, aceitabilidade, priorização de riscos e ponderação de critérios [7], aproximando o problema ao campo da Pesquisa Operacional *Soft*.

No caso específico dos sistemas energéticos militares, a decisão relevante não se limita à escolha de uma fonte, mas envolve a avaliação de diferentes configurações sob múltiplos atributos técnicos, logísticos e operacionais. Nessa perspectiva, o SCA, proposto originalmente por John Friend [9], apresenta-se como método de estruturação de problemas voltado ao apoio à tomada de decisão em contextos complexos e incertos. Ele é especialmente útil quando o desafio principal não é apenas calcular uma alternativa ótima, mas organizar opções, clarificar critérios, explicitar incertezas e construir compromissos progressivos entre atores e objetivos concorrentes. Essas características estão presentes no problema da resiliência energética militar. Dessa forma, o SCA pode contribuir com a estruturação desse problema, atuando previamente em complemento aos modelos de otimização e simulação, orientando a comparação entre alternativas energéticas.

III. METODOLOGIA

Este artigo aplica o *Strategic Choice Approach* (SCA) como método de estruturação de problemas para apoiar a decisão sobre arquiteturas energéticas voltadas à resiliência operacional militar de uma tropa em campanha. A aplicação foi delimitada ao problema de seleção de uma arquitetura energética para uma microrrede militar de pequeno porte, destinada a operar de forma isolada, sem apoio logístico externo.

A estruturação seguiu os quatro modos do SCA: modelagem, *design*, comparação e escolha. No modo modelagem, foram definidas as principais áreas de decisão do problema. No modo *design*, foram identificadas as alternativas possíveis a partir da combinação de opções dessas áreas. No modo comparação, as alternativas foram avaliadas qualitativamente segundo áreas de impacto sistêmico (áreas de

comparação). Por fim, no modo escolha, foram identificadas incertezas estratégicas e foi estruturado um pacote de compromisso para orientar decisões imediatas, decisões condicionadas, ações exploratórias e necessidades de monitoramento.

Ressalta-se o caráter exploratório da abordagem desse artigo, que se propõe a ser uma estruturação qualitativa preliminar do problema, feita a partir do ponto de vista dos autores, e não uma avaliação técnico-econômica completa das arquiteturas energéticas. Esclarece-se também que os resultados representam a visão dos autores e não representam a posição oficial do Exército a respeito do tema.

IV. RESULTADOS

A. Modo Modelagem

No modo modelagem, o problema foi organizado em quatro áreas principais de decisão: fonte de energia (FONTE_?), tipo de carga atendida (CARG_?), estratégia de distribuição das fontes de energia (DISTR_?) e forma de gerenciamento entre fontes de energia e cargas (GEREN_?). Essas 4 áreas foram escolhidas por comporem os referenciais técnicos para a arquitetura energética que atenderá a base e serem essenciais à equipe de planejamento técnico.

B. Modo Design

Para o modo *design*, foram consideradas as opções apresentadas na Tabela I para cada área de decisão. Após a combinação das opções das áreas de decisão, foram obtidos 24 arranjos teóricos. A triagem de aderência operacional reduziu esse conjunto a treze alternativas viáveis.

TABELA I. OPÇÕES PARA AS ÁREAS DE DECISÃO

Área de Decisão	Opção	Código
FONTE_?	Somente geradores a diesel	GE
	Somente energia solar com armazenamento	AS
	Sistema híbrido	HB
CARG_?	Apenas as cargas críticas operacionais	CO
	Todas as cargas	CT
DISTR_?	Centralizada	CE
	Descentralizada	DE
GEREN_?	Humano-dependente	HU
	Automatizado com técnicas de IA	AU

Foram considerados fora do escopo:

1) *Solar + baterias para todas as cargas*: elevada demanda energética, necessidade de grandes áreas de geração e armazenamento, maior exposição operacional e limitada viabilidade logística em ambientes degradados.

2) *Distribuição descentralizada sem automação*: baixa compatibilidade com resposta rápida, priorização dinâmica e consciência situacional energética, além de exigir efetivo especializado em múltiplos pontos.

3) *Arquitetura híbrida com gerenciamento humano-dependente*: elevada complexidade de coordenação entre múltiplas fontes, armazenamento energético e cargas críticas.

Para simplificar a apresentação das alternativas, adotou-se uma codificação composta pelas quatro áreas de decisão: fonte, carga, distribuição e gerenciamento. Assim, por exemplo, o código HB-CO-DE-AU representa uma arquitetura híbrida, voltada às cargas operacionais críticas, com distribuição descentralizada e gerenciamento automatizado com técnicas de IA.

C. Modo Comparação

As alternativas foram comparadas segundo cinco áreas de comparação: resiliência operacional (1), robustez logístico-física (2), robustez cibernética (3), furtividade operacional (4) e facilidade de operação (5). A escolha desses critérios foi fundamentada nas características do problema identificadas na literatura discutida no Referencial Teórico e nos requisitos técnico-operacionais associados às arquiteturas analisadas.

A seleção dessas áreas buscou representar dimensões distintas e complementares relevantes ao emprego de sistemas energéticos em ambiente militar. A resiliência operacional expressa a capacidade da arquitetura de manter as funções essenciais da missão diante de falhas e degradações; a robustez logístico-física considera a dependência de suprimentos, a exposição das linhas logísticas e a vulnerabilidade física dos ativos energéticos; a robustez cibernética contempla a exposição e a capacidade de proteção dos componentes digitais e de controle; a furtividade operacional considera as assinaturas associadas à geração e à distribuição de energia que podem favorecer sua detecção; e a facilidade de operação representa a complexidade de operação, coordenação e manutenção exigida da tropa.

Todas as áreas de comparação possuem sentido positivo de orientação. Dessa forma, avaliações mais altas representam condições mais favoráveis à missão, indicando maior continuidade operacional, menor vulnerabilidade logística e física, maior proteção ciberfísica, menor assinatura detectável e menor complexidade de operação e manutenção.

A Tabela II apresenta a comparação qualitativa das alternativas remanescentes, realizada por meio de escala em três níveis (Baixa, Média e Alta), em ordem crescente de contribuição favorável para o cumprimento da missão. As classificações foram atribuídas qualitativamente pelos autores, com base nas características técnico-operacionais decorrentes da combinação entre fonte, tipo de carga, distribuição e forma de gerenciamento de cada alternativa, não representando, portanto, valores absolutos de desempenho. Reitera-se que não foi empregado, nesta etapa exploratória, processo formal de elicitação com especialistas ou validação empírica das classificações. Os códigos seguem a sequência fonte-carga-distribuição-gerenciamento.

Em resiliência operacional (1), classificações mais altas indicam maior capacidade de manter a continuidade da missão, adaptar-se a falhas e sustentar cargas críticas em ambiente degradado. Nesse critério, as arquiteturas descentralizadas e automatizadas foram classificadas com maior resiliência operacional, devido à redução da dependência de pontos críticos concentrados e à maior capacidade de adaptação dinâmica. A combinação com fontes híbridas acrescenta redundância energética a essa configuração. As alternativas

que utilizam geração híbrida com automação, mas mantêm arquitetura centralizada, foram classificadas como de resiliência média, pois ainda apresentam dependência de pontos críticos concentrados. Já as alternativas baseadas exclusivamente em geração a diesel, com operação predominantemente humana e arquitetura centralizada, foram classificadas como de baixa resiliência, em razão da elevada dependência logística e da menor capacidade de adaptação a falhas.

TABELA II. COMPARAÇÃO ENTRE SISTEMAS

<i>Sistema</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>
GE-CO-CE-HU	Baixa	Baixa	Alta	Baixa	Alta
GE-CO-CE-AU	Média	Baixa	Média	Baixa	Média
GE-CO-DE-AU	Alta	Média	Média	Baixa	Média
GE-CT-CE-HU	Baixa	Baixa	Alta	Baixa	Média
GE-CT-CE-AU	Média	Baixa	Média	Baixa	Média
GE-CT-DE-AU	Alta	Média	Média	Baixa	Baixa
AS-CO-CE-HU	Média	Média	Alta	Média	Média
AS-CO-CE-AU	Média	Média	Média	Média	Média
AS-CO-DE-AU	Alta	Média	Baixa	Média	Baixa
HB-CO-CE-AU	Média	Média	Média	Média	Baixa
HB-CT-DE-AU	Alta	Média	Baixa	Média	Baixa
HB-CO-DE-AU	Alta	Alta	Baixa	Média	Baixa
HB-CT-CE-AU	Média	Média	Média	Média	Baixa

Em robustez logístico-física (2), níveis mais elevados representam menor dependência de reabastecimento, menor exposição das linhas logísticas e maior capacidade de sobrevivência frente a ataques físicos ou interrupções de suprimento. A combinação entre geração híbrida e distribuição descentralizada tende a favorecer esse critério, pela redução simultânea da dependência exclusiva de combustível e da vulnerabilidade a falhas concentradas. O maior nível foi atribuído à configuração híbrida, descentralizada e destinada às cargas críticas, por combinar esses benefícios com menor demanda energética e menor dimensão da infraestrutura necessária. Configurações destinadas ao atendimento integral das cargas, mesmo quando descentralizadas, foram mantidas em nível médio em razão da maior quantidade de ativos, capacidade instalada e infraestrutura a sustentar e proteger.

Em robustez cibernética (3), a classificação considera tanto a exposição digital quanto a capacidade potencial de proteção dos sistemas. Alternativas humano-dependentes e menos conectadas tendem a apresentar menor superfície de ataque, enquanto alternativas automatizadas dependem mais de sensores, comunicação e processamento digital. Contudo, a automação não foi tratada automaticamente como baixa robustez cibernética, pois sistemas inteligentes também podem favorecer monitoramento contínuo, detecção de anomalias e resposta rápida, desde que associados a protocolos multicamada, criptografia e mecanismos adequados de proteção [18].

Na avaliação da furtividade operacional (4), foram consideradas diferentes formas de assinatura associadas à arquitetura energética. Sistemas baseados exclusivamente em geradores a diesel foram classificados com furtividade baixa em razão, principalmente, das assinaturas acústica e térmica

decorrentes de sua operação. A incorporação de geração solar e armazenamento pode reduzir essas assinaturas, mas introduz outros elementos de detectabilidade, particularmente a assinatura visual e espectral associada à área ocupada, aos padrões geométricos e às características dos módulos fotovoltaicos. Por essa razão, as arquiteturas solares e híbridas foram classificadas de forma conservadora com furtividade média. Ressalta-se que essa avaliação é dependente do cenário, podendo variar conforme o ambiente de emprego, o perfil de operação dos equipamentos e as capacidades ISR adversárias.

Por fim, a facilidade de operação considera a complexidade de coordenação, operação e manutenção das arquiteturas. Arranjos centralizados, maduros e humano-dependentes tendem a ser mais simples, enquanto arquiteturas híbridas, descentralizadas ou automatizadas exigem maior integração entre fontes, armazenamento, cargas e sistemas de controle. Essa classificação não invalida os ganhos operacionais dessas alternativas, mas explicita o custo técnico e organizacional associado à sua adoção.

D. Modo Escolha

No modo escolha, os resultados da comparação foram utilizados para identificar alternativas mais aderentes ao problema e estruturar compromissos progressivos diante das incertezas remanescentes. Nessa etapa, o objetivo não é apontar uma alternativa ótima universal, mas indicar caminhos de decisão suficientemente robustos para diferentes cenários operacionais.

Entre as alternativas avaliadas, HB-CO-DE-AU e HB-CT-CE-AU foram selecionadas para representar duas respostas contrastantes a diferentes prioridades operacionais. Embora ambas combinem sistema híbrido e gerenciamento automatizado com técnicas de IA, a seleção decorre da análise dos compromissos associados a diferentes contextos de emprego. A alternativa HB-CO-DE-AU combina sistema híbrido, atendimento prioritário das cargas críticas operacionais, distribuição descentralizada e gerenciamento automatizado. Essa configuração é mais aderente a cenários de elevada degradação operacional, dispersão da força e maior risco de ataque físico à infraestrutura, pois reduz a criticidade de falhas concentradas e favorece a continuidade das funções essenciais da missão.

A alternativa HB-CT-CE-AU, por sua vez, combina sistema híbrido, atendimento de todas as cargas, distribuição centralizada e gerenciamento automatizado. Essa configuração é mais aderente a operações prolongadas, com maior previsibilidade logística e maior necessidade de sustentação humano-operacional, pois permite atender tanto as cargas críticas quanto as cargas de apoio à permanência da tropa. Assim, enquanto HB-CO-DE-AU privilegia sobrevivência, dispersão e continuidade mínima da missão em ambiente degradado, HB-CT-CE-AU privilegia sustentação ampliada, integração e permanência operacional da força por maior período.

A distinção entre essas alternativas também dialoga com o Conceito Operacional do Exército Brasileiro [19]. A alternativa HB-CO-DE-AU aproxima-se das exigências de dispersão, autonomia tática e continuidade sob degradação

associadas à descentralização do combate. Já a alternativa HB-CT-CE-AU aproxima-se de situações em que a sustentação prolongada da força e a preservação da infraestrutura humano-operacional assumem maior peso decisório. Assim, a escolha entre ambas não depende apenas de desempenho energético, mas da forma como a força pretende operar no ambiente multidomínio.

A escolha entre essas alternativas depende de incertezas ambientais, de valores e de agenda que não podem ser resolvidas apenas pela comparação técnica:

1) *Incetezas ambientais*: disponibilidade de combustível, variabilidade da geração solar, vida útil das baterias, risco de ataques físicos, evolução das ameaças cibernéticas e capacidade adversária de detecção por meios ISR.

2) *Incetezas de valores*: simplicidade operacional versus resiliência, prioridade entre cargas críticas e sustentação integral da tropa, grau aceitável de dependência digital e nível de exposição operacional tolerável.

3) *Incetezas de agenda*: disponibilidade orçamentária, maturidade tecnológica, evolução doutrinária, capacitação de pessoal e integração futura com sistemas militares inteligentes.

Diante dessas incertezas, o SCA permite formular um pacote de compromisso que combine decisões imediatas, decisões condicionadas, ações exploratórias e itens de monitoramento (Tabela III). Esse pacote busca evitar comprometimentos rígidos e prematuros, preservando flexibilidade decisória para adaptar a arquitetura energética ao cenário de emprego, à evolução tecnológica e às prioridades operacionais.

TABELA III. PACOTES DE COMPROMISSO

<i>Tipo de compromisso</i>	<i>Encaminhamento proposto</i>
Decisões imediatas	• Identificar cargas críticas operacionais; • Ampliar redundância energética; • Adotar gradualmente arquiteturas híbridas em instalações prioritárias; • Prever dispersão física de ativos quando viável.
Decisões condicionadas	• Ampliar automação em funções críticas; • Descentralizar a infraestrutura energética; • Substituir parcialmente geração convencional por renováveis com armazenamento; • Integrar sistemas energéticos a plataformas digitais de comando e controle.
Ações exploratórias	• Realizar projetos-piloto de microrredes híbridas; • Testar arquiteturas descentralizadas; • Simular ataques físicos e cibernéticos; • Avaliar gerenciamento adaptativo com IA; • Validar protocolos de operação degradada.
Monitoramento contínuo	• Acompanhar disponibilidade de combustível, evolução das baterias, ameaças cibernéticas, capacidades ISR adversárias, guerra eletrônica, custos tecnológicos e evolução doutrinária da Força.

O pacote de compromisso indica que a adoção de microrredes híbridas pode ser tratada como decisão de curto prazo, desde que implementada de forma gradual e associada à identificação das cargas críticas. Por outro lado, a descentralização ampla e o uso intensivo de automação em funções críticas devem ser tratados como decisões

condicionadas, dependentes da maturidade das tecnologias de controle, da disponibilidade de pessoal qualificado e da implementação de requisitos explícitos de proteção ciberfísica.

As ações exploratórias cumprem papel central na redução de incertezas. Projetos-piloto e simulações permitem avaliar, em ambiente controlado, o desempenho de arquiteturas híbridas e descentralizadas sob falhas, restrição logística, variação climática, ataques físicos e incidentes cibernéticos. Esses experimentos também podem apoiar a definição de protocolos de priorização de cargas, operação degradada e resposta a comprometimentos da infraestrutura energética.

Dessa forma, o modo escolha não encerra o problema com uma recomendação única, mas organiza uma trajetória decisória. A alternativa HB-CO-DE-AU pode ser priorizada como referência para cenários mais degradados, dispersos e orientados à sobrevivência das funções críticas. A alternativa HB-CT-CE-AU pode ser adotada como referência para instalações de maior permanência, nas quais a sustentação integral da tropa seja decisiva. Entre essas duas respostas, o pacote de compromisso preserva flexibilidade para adaptar a decisão às incertezas técnicas, logísticas, operacionais, cibernéticas e doutrinárias.

V. DISCUSSÃO

Os resultados indicam que a resiliência energética militar não depende apenas da substituição de uma fonte por outra, mas da composição entre fonte, perfil de carga, distribuição física dos ativos e capacidade de gerenciamento. Essa leitura está alinhada ao Conceito Operacional do Exército Brasileiro, que caracteriza o ambiente operacional futuro como multidomínio e multidimensional, marcado por hiperconectividade, automação ampliada, aceleração do combate, transparência do espaço de batalha e extrapolação dos efeitos para além do Teatro de Operações.

Nesse contexto, a arquitetura energética passa a ser parte da capacidade de combate, e não apenas infraestrutura de apoio. A aceleração do combate exige sistemas capazes de sustentar ciclos decisórios mais rápidos, priorizar cargas críticas e responder a falhas em prazos reduzidos. A automação ampliada, por sua vez, reforça a relevância de sistemas de gerenciamento energético capazes de apoiar a coordenação entre fontes, armazenamento e cargas, especialmente quando a velocidade dos eventos supera a capacidade humana de gestão manual contínua.

A descentralização do combate também tem implicações diretas para a resiliência energética. O COEB associa a tendência de descentralização à maior autonomia tática e liberdade de ação dos escalões subordinados, em áreas de operações expandidas e, por vezes, não contíguas. Nessa lógica, arquiteturas energéticas descentralizadas podem apoiar a dispersão da força, reduzir a criticidade de falhas concentradas e favorecer a continuidade parcial da missão em caso de degradação localizada. Esse ponto reforça a aderência da alternativa HB-CO-DE-AU a cenários nos quais sobrevivência, dispersão e continuidade das cargas críticas sejam prioritárias.

Por outro lado, a transparência do espaço de batalha impõe cautela à distribuição física dos ativos energéticos. A dispersão

reduz a vulnerabilidade a falhas concentradas, mas também amplia os pontos a proteger, coordenar e camuflar. Além disso, a adoção de geração solar reduz ruído e assinatura térmica associada aos geradores, mas pode introduzir assinatura visual e espectral dos módulos fotovoltaicos. Assim, a vantagem das arquiteturas solares ou híbridas depende do ambiente de observação, das capacidades ISR adversárias e das medidas de camuflagem, mobilidade e proteção adotadas.

A automação com técnicas de IA também deve ser interpretada à luz dessa ambivalência. Ela pode ampliar a dependência de sensores, comunicação, software e sistemas de controle, criando novas superfícies de ataque. Contudo, também pode fortalecer a capacidade de monitoramento, detecção de anomalias, priorização dinâmica de cargas e resposta rápida a falhas ou ataques. Essa interpretação é compatível com a discussão de [18], que associa microrredes, armazenamento, sistemas inteligentes de gestão, protocolos multicamada, monitoramento de rede, criptografia e IA à proteção e continuidade de instalações militares.

Assim, a decisão não se resume a escolher entre simplicidade e sofisticação tecnológica, mas a definir qual nível de integração ciberfísica é aceitável para cada cenário e quais camadas de proteção devem acompanhar essa integração. Esse ponto reforça a utilidade do SCA, pois o método permite tratar automação, descentralização e substituição parcial do diesel como compromissos progressivos, e não como escolhas binárias.

No caso analisado, HB-CO-DE-AU e HB-CT-CE-AU representam respostas adequadas a prioridades distintas. A primeira é mais aderente a cenários degradados, dispersos e orientados à continuidade das cargas críticas, dialogando com a descentralização do combate e com a necessidade de operar sob transparência e ameaça multidomínio. A segunda é mais aderente a operações prolongadas, em que a sustentação integral da instalação e da tropa assume papel decisivo. Portanto, o resultado mais relevante não é a indicação de uma alternativa vencedora, mas a explicitação das condições doutrinárias e operacionais em que cada arquitetura se torna mais adequada.

VI. CONCLUSÃO

Este artigo aplicou o *Strategic Choice Approach* ao problema da resiliência energética militar em microrredes táticas. A análise evidenciou que a escolha entre geradores a diesel, energia solar com armazenamento e arquiteturas híbridas constitui uma decisão estratégica multicritério, envolvendo continuidade da missão, robustez logístico-física, robustez cibernética, furtividade operacional e facilidade de operação.

O SCA mostrou-se útil para estruturar o problema em áreas de decisão, reduzir o conjunto inicial de alternativas a arranjos operacionalmente viáveis, comparar seus impactos e, sobretudo, organizar compromissos progressivos diante das incertezas remanescentes. Isso é particularmente relevante tendo em vista que a resiliência energética é um fator habilitador para o combate moderno, marcado por maior dispersão, dinamismo e dependência de sistemas tecnológicos.

Destacaram-se duas alternativas, ambas baseadas em sistemas híbridos e controle automatizado, tendo, entretanto, prioridades de combate distintas. A primeira, atendendo apenas às cargas operacionais e distribuição descentralizada, favorece a dispersão, a sobrevivência e a continuidade das cargas críticas em ambientes degradados. A segunda, com atendimento centralizado de todas as cargas, favorece a sustentação integral da instalação e a permanência prolongada da força.

No entanto, mais do que apontar uma solução única, o estudo reforça a necessidade de decisões graduais e adaptativas. Nesse contexto, ganha centralidade o conjunto de compromissos propostos: decisões imediatas voltadas à identificação de cargas críticas e ao aumento da redundância; decisões condicionadas à evolução tecnológica e ao ambiente operacional; ações exploratórias que permitam testar soluções em escala reduzida; e mecanismos de monitoramento contínuo para ajustar o curso das decisões. Esses compromissos oferecem um caminho pragmático para lidar com incertezas técnicas, logísticas e operacionais, permitindo que a adoção de soluções energéticas ocorra de forma progressiva, informada e alinhada às necessidades da missão.

Como limitações, destaca-se que o estudo se baseou apenas em modelagem conceitual e análise qualitativa, sem validação empírica em ambiente operacional real. As alternativas consideradas foram simplificadas, não contemplando toda a diversidade de configurações possíveis nem variáveis específicas de diferentes teatros de operações.

Como trabalhos futuros, sugere-se a realização de estudos empíricos visando validar as alternativas propostas e refinar os parâmetros de decisão, incluindo a participação de especialistas militares nessa validação. Além disso, recomenda-se a incorporação de simulação de cenários com ameaças cibernéticas e físicas e o desenvolvimento de modelos quantitativos que integrem custos, disponibilidade energética, autonomia requerida e riscos operacionais.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. SDG.

REFERÊNCIAS

- [1] C. Samaras, W. J. Nuttall, and M. Bazilian, “Energy and the military : Convergence of security , economic , and environmental decision-making,” *Energy Strateg. Rev.*, vol. 26, no. January, p. 100409, 2019.
- [2] O. Saritas and S. Burmaoglu, “Future of sustainable military operations under emerging energy and security considerations,” *Technol. Forecast. Soc. Change*, vol. 102, pp. 331–343, Jan. 2016.
- [3] J. Mingers and J. Rosenhead, “Problem structuring methods in action,” vol. 152, pp. 530–554, 2004.
- [4] U. Berardi, E. Tomassoni, and K. Khaled, “A smart hybrid energy system grid for energy efficiency in remote areas for the army,” *Energies*, vol. 13, no. 9, pp. 1–22, 2020.
- [5] M. S. Scioletti, A. M. Newman, J. K. Goodman, A. J. Zolan, and S. Leyffer, “Optimal design and dispatch of a system of diesel generators, photovoltaics and batteries for remote locations,” *Optim. Eng.*, vol. 18, no. 3, pp. 755–792, 2017.

- [6] J. J. He, D. L. Van Bossuyt, and A. Pollman, “Experimental Validation of Systems Engineering Resilience Models for Islanded Microgrids,” *Systems*, vol. 10, no. 6, 2022.
- [7] P. Lebepe and T. N. D. Mathaba, “Enhancing energy resilience in enterprises : a multi - criteria approach,” *Sustain. Energy Res.*, 2025.
- [8] T. Witt and M. Klumpp, “Multi-Period Multi-Criteria Decision Making under Uncertainty : A Renewable Energy Transition Case from Germany,” pp. 1–20, 2021.
- [9] J. Friend, “The Strategic Choice Approach,” *Wiley Encycl. Oper. Res. Manag. Sci.*, pp. 1–12, 2010.
- [10] P. Devulapally, R. Krishan, and S. M. Ieee, “Optimal Allocation of Solar PV Generation and Energy Storage Systems in a Military Microgrid including V2G Operation,” *2025 IEEE 5th Int. Conf. Sustain. Energy Futur. Electr. Transp.*, pp. 1–6, 2025.
- [11] H. Jakson, V. Musakko, A. Päril, and I. Palu, “A Mission-Centric Review of Tactical Energy Innovations for Distributed Military Operations,” *Int. Sci. Conf. Power Electr. Eng. Riga Tech. Univ. RTUCON*, no. 2025, 2025.
- [12] J. Mallery, D. L. Van Bossuyt, and A. Pollman, “Defense Installation Energy Resilience for Changing Operational Requirements,” *Designs*, vol. 6, no. 2, 2022.
- [13] J. Pearson, T. Wagner, J. Delorit, and S. Schultdt, “Cost analysis of optimized islanded energy systems in a dispersed air base conflict,” *Energies*, vol. 13, no. 18, 2020.
- [14] M. Mori *et al.*, “Green energy hubs for the military that can also support the civilian mobility sector with green hydrogen,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 48, no. 99, pp. 39138–39153, 2023.
- [15] M. Mori, U. Ž. Bašković, T. Katrašnik, R. Šipec, and B. Drobnič, “Securing Autonomy of Military Barracks Through Renewable Energy Solutions,” *Contemp. Mil. Challenges*, vol. 25, no. 3–4, pp. 87–109, 2023.
- [16] S. K. Sahoo, D. Pamucar, and S. S. Goswami, “A Review of Multi-Criteria Decision-Making Applications to Solve Energy Management Problems From 2010-2025 : Current State and Future Research,” vol. 2, no. 1, pp. 219–241, 2025.
- [17] M. Haji, S. Namany, and T. Al-ansari, “Strengthening resilience : decentralized decision-making and multi-criteria analysis in the energy-water-food nexus systems,” no. May, 2024.
- [18] O. Semenenko *et al.*, “Machinery & Energetics Innovative technologies to improve energy efficiency and security of military facilities,” vol. 15, no. 4, pp. 147–156, 2024.
- [19] Brasil, “Manual de Fundamentos: Conceito Operacional do Exército Brasileiro (EB20-MF-07.101),” Brasília/DF, 2026.