

# Sistemas mecatrônicos militares autônomos: motivações, aplicações e aspectos doutrinários

*Aldélio Bueno Caldeira\**

## Introdução

Sistemas mecatrônicos militares estão no cerne da revolução tecnológica militar em curso, na qual sistemas de armas como mísseis, munições inteligentes, veículos não tripulados e robôs têm modificado a Arte da Guerra em diferentes dimensões, repercutindo na doutrina militar, nas operações militares e trazendo à tona questões sociais, éticas e legais (Caldeira, 2018).

**A** terceira revolução tecnológica militar, marcada pelo uso de armas autônomas, deverá se intensificar nos próximos anos, modificando significativamente os conflitos armados. A atual revolução tecnológica militar foi precedida pela primeira, baseada no domínio da pólvora, e pela segunda, alcançada com o advento das armas nucleares (Etzioni; Etzioni, 2017).

Os sistemas mecatrônicos integram de forma sinérgica a engenharia mecânica, a eletrônica, os sistemas de controle e a computação (Awtar *et al.*, 2002). Esses sistemas, portanto, estão presentes nos campos de batalha desde o início do século XX, destacando-se as bombas V1 e V2 usadas na Segunda Guerra Mundial (Caldeira, 2018).

O uso de veículos terrestres e aéreos não tripulados e de robôs em operações militares já é uma realidade. Questionamentos, junto à Organização das Nações Unidas (ONU), quanto ao uso de tais sistemas de armas, entretanto, têm sido realizados por personalidades

internacionais, como o cientista Stephen Hawking e o empresário Elon Musk, que alertam para a

[...] “terceira revolução bélica” com a iminente chegada de robôs e equipes não tripuladas que poderiam elevar as guerras a confrontos com consequências imprevisíveis. Nesse sentido, os signatários advertem que a veloz evolução da inteligência artificial pode permitir que o desenvolvimento dessas armas autônomas chegue em poucos anos e não em décadas [...] (Zuriarrain; Pozzi, 2017).

É interessante ressaltar que esses questionamentos se voltam especialmente para os *sistemas mecatrônicos militares autônomos* (SMMA) com inteligência artificial (IA). Assim, o âmago da questão está na “ideia de que, em um futuro não muito distante, se perca a compaixão e o julgamento humano na hora de executar um ataque” (Zuriarrain; Pozzi, 2017). Logo, muitos SMMA, dentre os quais os mísseis e as munições inteligentes, com sistemas de guiamento *fire and forget*, não estão no escopo dessas indagações, apesar desses sistemas poderem perseguir e engajar alvos de forma autônoma. A decisão de disparar esses artefatos sobre um alvo, contudo, ainda depende do fator humano.

Pode-se inferir que os SMMA com capacidade de autonomamente selecionar alvos e atacar são de fato o principal objeto de questionamentos de alguns setores

\* Cel QEM (IME/1997, EsAO/2005, CDEM/ECEME/2018 e CPEAEx/2023). Possui também mestrado e doutorado em Engenharia Mecânica pela UERJ (1998 e 2004) e pós-doutorado em Engenharia Mecânica na University of Central Florida, EUA, (2014). Atualmente está no Estado-Maior do Exército, em Brasília.

da comunidade internacional. O banimento desses sistemas autônomos das operações militares é advogado por 116 empresários da área de robótica e de inteligência artificial, oriundos de 26 países, os quais se manifestaram em carta aberta à ONU (Ackerman, 2017). Ademais, é relevante observar que a ONU mantém um grupo de estudo denominado “*Group of Governmental Experts on Lethal Autonomous Weapons Systems*”, no âmbito da CCW (*Certain Conventional Weapons*), o qual tem contribuído para as negociações de acordos e resoluções sobre o tema (UNOG, 2017).

Além disso, existe, nos dias atuais, uma grande preocupação com o uso de veículos não tripulados remotamente pilotados. Considera-se a possibilidade de esses sistemas aumentarem a frequência dos conflitos armados, em face da eliminação da presença do combatente humano do campo de batalha (Caldeira, 2018).

A diferença entre os SMMA controlados remotamente e os que fazem uso da inteligência artificial está no grau de autonomia empregado. O grau de autonomia está associado diretamente à inserção do homem no sistema, podendo ser classificado como: semiautônomo, supervisionado por humano e completamente autônomo (Caton, 2015):

- os sistemas semiautônomos se caracterizam por engajar alvos somente selecionados por um operador humano;
- os sistemas supervisionados por humano são capazes de selecionar alvos e atacar autonomamente, porém um supervisor humano pode intervir e abortar a missão; e
- os sistemas completamente autônomos são capazes de selecionar alvos e atacar sem qualquer possibilidade de intervenção humana.

Os níveis de autonomia dos SMMA estão relacionados aos níveis de desenvolvimento tecnológico e doutrinário. Ou seja, a diminuição da interação humana na operação do sistema implica maior desenvolvimento tecnológico, bem como maiores inovações doutrinárias (Caldeira, 2018).

Vale destacar que existe uma gama de SMMA que são destinados às missões logísticas, humanitárias, de vigilância, de inteligência e de resgate de feridos, dentre outras e, portanto, destinam-se a missões não letais.

Nesse contexto, atento ao protagonismo dos SMMA nos conflitos bélicos atuais e futuros, o Exército Brasileiro aprovou o *Manual de Fundamentos Conceito Operacional do Exército Brasileiro – Operações de Convergência 2040* (EB20-MF-07.101), 1ª edição, por meio da Portaria – EME/C Ex nº 971, de 10 de fevereiro de 2023, que estabelece o conceito de “automação ampliada”, ressaltando que:

O combate vem sendo submetido a um processo contínuo de digitalização e automação. Conflitos travados ao longo das duas últimas décadas demonstraram a importância de sistemas de defesa antimíssil, aeronaves remotamente pilotadas e munições guiadas, por exemplo. Entretanto, o desenvolvimento e a integração de IA, computação quântica e análise de metadados (“bigdata”) irá elevar drasticamente os níveis de automação.

a) Muitas tarefas realizadas por seres humanos no campo de batalha, incluindo seus respectivos processos de tomada de decisões, em breve, serão compartilhadas com máquinas. Sob muitos aspectos, o grau de desenvolvimento e participação humana na dinâmica do combate será sensivelmente reduzido, em decorrência da introdução de sistemas mecatrônicos militares autônomos (SMMA). A automação ampliada resultará no largo emprego de soluções que congreguem plataformas SMMA integradas multipropósitos, incluindo sistemas de enxames robóticos.

b) Enxames multirrobóticos desafiarão a capacidade de sobrevivência das unidades convencionais em combate (Brasil, 2023).

É relevante observar que o termo *sistema mecatrônico militar autônomo* (SMMA) é mais abrangente que o termo *sistema robótico militar* (SRM), por contemplar sistemas tripulados e não tripulados, enquanto o termo SRM se restringe a sistemas não tripulados (Oliveira, 1993).

[...] o Instituto de Investigação para Antropotécnica de Werthovem (Alemanha) definiu o robô militar como: “Um sistema técnico não tripulado, que em sua aplicação militar, especialmente no campo de batalha, pode assumir de forma autônoma ou semiautônoma, missões do ser humano, com a finalidade de substituir o soldado, retirando-o da zona de perigo” (Oliveira, 1993).

O problema a ser abordado neste trabalho reside em apresentar um estudo sobre sistemas mecatrônicos militares autônomos, visando a contribuir para a discussão das repercussões nas missões e nas operações militares.

## Operações e doutrina

As influências nas operações e na doutrina decorrentes do emprego de SMMA nos conflitos bélicos podem ser divididas segundo os seguintes objetivos:

- identificar as motivações relacionadas à implantação dos SMMA nas FA;
- identificar aplicações e aspectos doutrinários relacionados ao emprego dos SMMA nas operações militares;
- identificar os aspectos relativos à doutrina e ao emprego de enxames e de equipes híbridas de combate.

## Motivações

Os SMMA têm o potencial de modificar os futuros conflitos bélicos, influenciando a estratégia, a doutrina e o pensamento militar. Motivações militares e econômicas têm acelerado o processo de introdução dos sistemas autônomos nas Forças Armadas.

Do ponto de vista militar, os sistemas autônomos possibilitam a realização de missões com maior segurança, com menos danos colaterais e com maior profundidade, posto que os SMMA contribuem para o aumento da consciência situacional, da precisão e para a diminuição do número de militares na zona de combate, além de afastar os militares das atividades mais perigosas.

Um cenário futuro vislumbra que forças estratégicas serão deslocadas para fora do teatro de operações e as forças táticas poderão perder o contato com o inimigo, sendo essa tarefa delegada aos sistemas autônomos (Caldeira, 2018).

O aspecto econômico tem impulsionado a utilização dos SMMA. Os custos militares com pessoal e com material têm crescido muito e impactam sobremaneira nas contas públicas. Os custos com o treinamento militar, com militares baixados, na reserva remunerada e reformados são fatores relevantes que têm motivado vários exércitos no mundo a reduzir seus efetivos.

O Exército dos EUA está tentando reduzir o número de seu pessoal e adotar mais robôs nos próximos anos [...]. O Exército deve encolher de 540.000 para 420.000 pessoas até 2019. Para manter a mesma efetividade enquanto reduz a força de trabalho humana, o Exército aumentará o poder não tripulado, na forma de robôs. O fato é que as pessoas e, antes de tudo, a vida delas são o principal custo. Além disso, treinar, alimentar e suprir os soldados durante a guerra é caro, e depois que os soldados deixam o serviço, há uma vida inteira de cuidados médicos para cobrir (Sapaty, 2015, tradução do autor).

Adicionalmente, os custos com os materiais de emprego militar, particularmente os com elevada tecnologia, têm crescido severamente. De acordo com Scharre (2014b), o número de navios e de aviões de combate tripulados nas forças armadas americanas, entre 2001 e 2008, reduziu, respectivamente, em 10% e em 20%. Por outro lado, os custos por unidade de material cresceram. Como exemplo, os custos com uma única aeronave tripulada de combate típica subiram da ordem de 120 milhões de dólares para aproximadamente 200 milhões de dólares entre 2000 e 2010 (Scharre, 2014b).

A redução do orçamento das Forças Armadas tem um impacto na doutrina militar, a qual precisa se adaptar a essa nova realidade e simultaneamente aumentar sua efetividade. A ciência e a tecnologia são aliadas nesse processo de adequação.

O vencedor da revolução robótica não será quem desenvolve essa tecnologia primeiro ou mesmo quem tem a melhor tecnologia, mas quem descobre como melhor usá-la (Scharre, 2014, tradução do autor).

## Aplicações e aspectos doutrinários

A introdução de novas tecnologias no EB tem por objetivo o provimento ou ampliação de capacidades necessárias para:

o cumprimento de sua destinação constitucional por meio da manutenção da Força Terrestre em adequado estado de prontidão, estruturada e preparada para o cumprimento de missões operacionais terrestres, conjuntas e interagências. Tal estado de prontidão decorre do contínuo processo de transformação, na busca de novas capacidades, sob a orientação das características doutrinárias de flexibilidade, adaptabilidade, modularidade, elasticidade e sustentabilidade (Brasil, 2016b).

As características doutrinárias de flexibilidade, adaptabilidade, modularidade, elasticidade e sustentabilidade podem ser incrementadas ou alcançadas por meio da adoção de SMMA. Esses sistemas possibilitam uma significativa ampliação das capacidades operativas, aumentando a consciência situacional, a projeção de poder, a segurança e a profundidade das operações. Entende-se por capacidade operativa:

[...] a aptidão requerida a uma força ou organização militar, para que possa obter um efeito estratégico, operacional ou tático. É obtida a partir de um conjunto de sete fatores determinantes, inter-relacionados e indissociáveis: Doutrina, Organização (e/ou processos), Adestramento, Material, Educação, Pessoal e Infraestrutura – que formam o acrônimo DOAMEPI (Brasil, 2015).

Nesse sentido, a introdução de SMMA no EB não é uma tarefa simples e deve vir acompanhada de ações que concretizem o acrônimo DOAMEPI, observando também aspectos logísticos, sobretudo manutenção e suprimento.

A forma como essas plataformas e sistemas serão integrados às futuras estruturas da força [...] é uma questão complexa, exigindo análise e planejamento consideráveis, assim como associa questões éticas e jurídicas acerca do seu emprego (Martinic, 2014b, tradução do autor).

A implantação gradativa dos sistemas autônomos nas Forças Armadas de diversos países tem se iniciado

pelas operações de *inteligência, reconhecimento e vigilância* (IRV), pelas atividades de neutralização de explosivos, bem como por atividades logísticas de suprimento. Isso corrobora o processo em curso no EB, atualmente voltado para sistemas de aeronaves remotamente pilotados (SARP) e sistemas de veículos terrestres remotamente pilotados (SVTRP).

A dotação de SMMA também se dá a partir de sistemas menos complexos para os mais complexos, começando pelos sistemas semiautônomos até os completamente autônomos. Essa graduação favorece a adaptação cultural das instituições aos novos meios, às novas formas de trabalho e aos novos processos. Os SMMA mudam a cultura organizacional, por vezes resultando em quebras de paradigmas. Muitos desses paradigmas transcendem a organização militar, estando presentes em considerações civis, éticas e jurídicas. Esses fatores, e não o desenvolvimento tecnológico, têm atrasado a utilização de sistemas completamente autônomos nos conflitos militares.

Já é possível construir sistemas que podem identificar, direcionar e engajar forças inimigas, embora as atuais diretrizes do DoD (Departamento de Defesa dos EUA) determinem que um ser humano esteja no circuito para decisões ofensivas de força letal (Work; Brimley, 2014, tradução do autor).

O **quadro 1** apresenta diferentes categorias de SARP e os respectivos níveis do elemento de emprego, variando do nível subunidade até o nível do Ministério da Defesa. O nível de elemento de emprego é um aspecto doutrinário importante, pois está associado ao tipo de emprego: se tático, operacional ou estratégico.

Grupo	Categoria (Cat)	Elemento de emprego	Nível de Emprego
III	5	MD/EMCFA	Estratégico
	4	C Cj	
II	3	CEx/DE	Operacional
	2	DE/Bda	
	1	Bda/U	
I	0	até SU	Tático

Quadro 1 – Categorias dos SARP para a F Ter  
Fonte: Brasil (2020)

A doutrina militar do EB contempla a utilização de SARP (Brasil, 2020), estabelecendo as missões típicas dos SARP nas operações:

- inteligência;
- reconhecimento;
- vigilância;
- aquisição de alvos;
- comando e controle;
- guerra eletrônica;
- identificação, localização, designação de alvos;
- logística; e
- outras missões.

O Plano Estratégico do Exército 2020-2023 (Brasil, 2019) elenca manutenção do processo de desenvolvimento de SARP e de SVTRP.

Os sistemas de veículo terrestre não tripulado (VTNT) necessitam de fundamentação doutrinária, a qual pode ser, em certa medida, similar à desenvolvida para os SARP, podendo os SVTRP ser utilizado nos mesmos tipos de missões táticas previstas em Brasil (2020) para os SARP.

Sem dúvida, as vantagens mais valiosas dos VTNT são sua capacidade de executar tarefas IRV, para ajudar e complementar a mobilidade dos soldados no campo de batalha e, quando armado, para projetar poder de fogo enquanto protege o operador da ação direta do inimigo. Esses recursos os tornaram particularmente atraentes para as forças armadas e para forças policiais em todo o mundo, incluindo a guerra não convencional e operações antiterroristas (Martinic, 2014b, tradução do autor).

O sucesso dos VTNT no Exército Americano é constatado pelo grande número desses veículos utilizados no Iraque e no Afeganistão.

Nos últimos anos, por exemplo, o Exército dos EUA e o Corpo de Fuzileiros Navais dos EUA, supostamente, utilizaram pelo menos 6.000 VTNT no Iraque e no Afeganistão, especialmente em inteligência, reconhecimento e vigilância (IRV), bem como para a detecção de dispositivos explosivos (Martinic, 2014b, tradução do autor).

O uso de VTNT pelo Exército atende ao objetivo de afastar o homem das atividades de maior risco, repetitivas e enfadonhas, ampliando a capacidade de trabalho e reduzindo o efetivo necessário para o cumprimento das missões (Caldeira, 2018).

Os VTNT são versáteis, ágeis e relativamente resistentes. Além disso, com a capacidade de executar tarefas repetitivas com velocidade e precisão – e sendo desprovidos de emoção humana – os VTNT são tenazes, incansáveis e destemidos. Isso os torna extremamente úteis para um grupo de tarefas mais mundanas, tediosas e perigosas no moderno campo de batalha, especialmente aquelas que de outro modo exporiam combatentes ou operadores humanos a risco de lesão ou morte maior do que o normal (Martinic, 2014b, tradução do autor).

As operações logísticas serão revolucionadas na guerra do futuro, com destaque para o intenso uso de sistemas autônomos. O uso de veículos aéreos não tripulados (VANT) para o suprimento aéreo, com raio de ação de uma milha, com ênfase para pequenas cargas em áreas conflagradas, como forma de suprir tropas isoladas e dispersas em áreas de risco tem sido objeto de pesquisa (Ivanova *et al.*, 2016) e deve ser concretizado em curto prazo. Essa aplicação tem sido alvo do interesse de grandes empresas de logística voltadas para atividades civis (Ivanova *et al.*, 2016).

Para logística, sistemas não tripulados podem facilitar as tarefas de transporte e reabastecimento, bem como apoiar rotinas de manutenção, como inspeções (Caton, 2015, tradução do autor).

Não obstante, cargas maiores e raios de ação maiores também podem ser atendidos por meio de VANT logísticos. Esses VANT, contudo, são mais caros e carecem de sistemas de contramedidas mais sofisticados (Ivanova *et al.*, 2016). Uma alternativa no sentido de redução de custos é a utilização de *kits* que transformem aeronaves tripuladas em não tripuladas. Tais kits já foram testados no Afeganistão, em 2011, no helicóptero K-Max (Ivanova *et al.*, 2016).

Uma outra aplicação de VANT na logística é o lançamento preciso de cargas guiadas com paraquedas (Ivanova *et al.*, 2016).

Essa tecnologia está bem estabelecida. Entretanto aprimoramentos contínuos têm ampliado a gama de missões atendidas, visando maiores cargas, maiores altitudes de lançamento e maior precisão. Os sistemas também têm evoluído de semiautônomos para os completamente autônomos e o guiamento tem incorporado diferentes tecnologias como GPS e reconhecimento de imagem. Ademais, o uso desses sistemas em situações de catástrofes naturais, e no suprimento de áreas isoladas, de plataformas de petróleo, e de navios, aumenta o mercado para futuros produtos (Caldeira, 2018).

Com relação aos VTNT em operações logísticas, uma potencial aplicação seria o emprego de comboios autônomos.

A questão do suprimento por comboios abre espaço para diferentes soluções. O comboio poderia ser completamente autônomo ou parcialmente autônomo. O veículo líder poderia ser tripulado ou não tripulado, enquanto os demais seriam veículos autônomos seguidores. O uso de veículos seguidores simplifica o sistema, reduzindo os custos. Os veículos autônomos seguidores são mais simples, pois prescindem de sistemas complexos de navegação em ambientes não estruturados, posto que a navegação é feita pelo veículo líder, este sim precisa ser tripulado ou mesmo completamente autônomo, com elevada capacidade de navegação.

Entretanto, em regiões com maior risco de explosivos improvisados ou de minas, o veículo líder poderia ser completamente autônomo ou semiautônomo, sendo os outros integrantes do comboio tripulados. Essa proposta visa aumentar a segurança do comboio, posto que o veículo líder seria destruído ao acionar o explosivo, porém a tropa estaria protegida.

Assim, como nos VANT, a utilização de *kits* de conversão de veículos tripulados para autônomos é uma alternativa relevante para a redução de custos (Caldeira, 2018).

Robôs ou VTNT também estão em desenvolvimento para atender as necessidades de transporte de material de pequenas frações. Frequentemente, esses veículos

recebem o nome de *mulas* (Sapatiy, 2015, tradução do autor).

A evacuação de feridos é outra atividade importante de operações logísticas que poderá ser realizada por robôs. A atividade de resgate e extração de feridos é classificada como de elevado risco.

O resgate de soldados gravemente feridos, sob fogo, é em si uma das principais causas de morte de militar por lesão traumática. Algumas fontes estimam que até 86% das mortes no campo de batalha ocorrem após os primeiros 30 minutos da lesão. [...] veículos não tripulados estão sendo desenvolvidos para a extração de vítimas do campo de batalha [...], a fim de reduzir esta incidência (Martinic, 2014, tradução do autor).

Robôs humanoides, como o Atlas da Boston Dynamics, têm evoluído muito e serão capazes de, em curto espaço de tempo, realizar atividades de apoio logístico em áreas de risco. A extração de feridos é uma das possibilidades de emprego. O acelerado processo de desenvolvimento tecnológico viabilizará, contudo, a longo prazo, que muitas das atividades, hoje atribuídas aos soldados no campo de batalha, sejam realizadas por robôs. Atualmente, o robô SGR-1 da Samsung é um robô sentinela armado com uma metralhadora 5,5mm e com um lançador de granadas 40mm (Prigg, 2014).

Além das atividades logísticas, as missões de ataque serão realizadas por SMMA na guerra do futuro. VANT, VTNT e robôs estão sendo desenvolvidos e utilizados como armas estratégicas e táticas.

Capacidades de aplicação da força já foram provadas em combate por VANT conduzindo operações ofensivas contra alvos de alto valor. VTNT são também projetados para ter aplicações letais, como reconhecimento armado, bem como operações não letais, como o controle de multidões (Caton, 2015, tradução do autor).

As operações empreendidas pelos Estados Unidos com o VANT MQ-9 Reaper na Guerra Contra o Terror é o exemplo de maior sucesso de uso de SMMA de ataque. Dentre os VTNT, um exemplo é o Black Knight da BAE Systems, armado com um canhão 25mm.

O Black Knight fornece um indicativo do que poderá acontecer no futuro próximo. Uma possibilidade é a constituição de esquadrões autônomos ou híbridos (com veículos não tripulados e tripulados), o que resultará em uma revolução na doutrina militar a fim de definir a forma de atuação dessas subunidades.

Os SMMA não se restringirão a simplesmente substituir os humanos, mas executarão as missões de outra forma, porém essa nova forma deverá ser concebida pela doutrina.

O Roteiro Integrado postula que esta ordem pode levar a sistemas que atuam além da mera substituição de sistemas tripulados, permitindo assim formações e táticas mais ágeis e manobráveis. Também sugere que sistemas não tripulados poderiam ser usados como ativos descartáveis de baixo custo, um conceito que inverte o foco atual em aquisição de sistemas complexos e caros que muitas vezes requer planejamento de risco adverso. Mas como se determina os melhores tipos de sistemas não tripulados para adquirir? E qual é a melhor maneira de misturar esses sistemas com combatentes humanos em uma força coesa (Caton, 2015, tradução do autor)?

O conceito de SMMA descartável de baixo custo viabiliza muitas aplicações militares, tanto de apoio logístico como de ataque.

Considerando tamanhos menores e quantidades maiores, sistemas não tripulados podem ser construídos para serem perdidos em combate, tornando a sobrevivência uma característica não de indivíduo, mas de um enxame de sistemas autônomos (Work; Brimley, 2014, tradução do autor).

Em grande medida, o SMMA descartável de baixo custo se aproxima do conceito de míssil ou mesmo de munição inteligente. Nesse contexto, inserem-se as *munições remotamente pilotadas* (MRP), também conhecidas como *loitering munition*.

Uma característica definidora das MRP é a capacidade de “vagar” no ar (do inglês *loitering*) antes de selecionar o alvo, permitindo ao operador do sistema

a flexibilidade para decidir quando e o que atacar. Essa característica das MRP as separa dos mísseis e foguetes mais tradicionais, pois conseguem operar como pequenas aeronaves em atividades de vigilância e reconhecimento antes de impactar seu objetivo como um míssil ar-terra comum (Strassburger & Annes 2022).

O uso de pequenos VANT de baixo custo tem grande aplicabilidade para pequenas unidades de combate. Esses sistemas podem realizar missões de vigilância, reconhecimento e de apoio de fogo, aumentando a autonomia dessas pequenas frações.

Um notável uso particular para pequenos veículos aéreos não tripulados é a capacidade de colocar suporte aéreo diretamente nas mãos das tropas em terra. [...] Um pequeno veículo aéreo de precisão, o *Switchblade* é uma “arma de combate de fogo final” que fornece apoio de fogo aproximado, colocado diretamente nas mãos de tropas terrestres e torna o apoio de fogo instantaneamente disponível (Scharre, 2014b, tradução do autor).

Todo o desenvolvimento tecnológico associado aos SMMA, entretanto, somente será efetivo na *guerra do futuro* se acompanhado do desenvolvimento doutrinário.

Enquanto a tecnologia oferece equipamentos mais novos, seu sucesso no campo de batalha só pode ser alcançado por meio de inovações doutrinárias eficazes (Bhalla, 2015, tradução do autor).

A adoção de SMMA pode implicar um aumento significativo de informações do ambiente operacional, contribuindo para o processo decisório, porém demandando mais trabalho da equipe de analistas de informação.

Depois que os dados são recebidos, eles precisam ser usados pelos analistas para tirar conclusões para os tomadores de decisão. Como exemplo ilustrativo, o aumento nos dados coletados pelo VANT Predator para o Departamento de Defesa dos EUA (DoD) resultou em um aumento de 30% no número de analistas necessários para classificá-los (Ivanova *et al.*, 2016, tradução do autor).

Assim, é essencial que a IA também evolua no sentido de aumentar a capacidade de análise autônoma de dados de forma a favorecer o processo decisório.

A grande quantidade de dados agora disponíveis está muito além da capacidade de qualquer humano processar, correlacionar e agir sobre isso. A análise de grandes conjuntos de dados – agora conhecida como *big data* – se tornará fundamental na competição econômica, científica e militar (Work; Brimley, 2014, tradução do autor).

## Enxames e equipes híbridas de combate

Estudos prospectivos indicam que, na guerra do futuro, formações de batalha combinarão soldados e sistemas autônomos, dando origem a equipes híbridas de combate. Essas unidades de combate são identificadas na doutrina americana como *manned-unmanned systems team* (MUM-T).

O sucesso das forças MUM-T não depende somente da interação entre humanos e máquinas, mas também da interoperabilidade entre máquinas. (...)

A Diretiva DoD 3000.09 determina o desenvolvimento de doutrinas e táticas, técnicas e procedimentos (TTPs) para aplicações de sistemas autônomos, bem como suas revisões periódicas para garantir que estejam apropriadas para mudanças a fim de atender as reais condições operacionais. Ele enfatiza que a doutrina e as táticas devem “demonstrar a capacidade de permitir que comandantes e operadores exerçam níveis apropriados de julgamento humano no uso da força”, e cumpram todas as regras legais e de segurança (Caton, 2015, tradução do autor).

Essas equipes abrem espaço para diversas questões doutrinárias, desde o nível da unidade que receberá esse tipo de formação, até questões de hierarquia no campo de batalha e do nível decisório atribuído ao sistema autônomo.

Qual é a entidade operacional primária para uma dada missão? Os seres humanos são o elemento de força suportado ou eles estão apoiando o sistema não

tripulado? Esses papéis mudam em diferentes fases da missão?

Quão autônoma é permitida a operação de um sistema autônomo quando gerenciando não só a sua capacidade inerente, mas também a intenção do comandante, leis de guerra e regras de engajamento? (Caton, 2015, tradução do autor).

A concretização dessas equipes de combate demandará grandes avanços tecnológicos na interface homem-máquina, observando a interação com elementos externos à equipe: inimigos, amigos e civis, operações conjuntas e de alianças.

Em termos de interface homem-máquina (HMI), um desafio significativo é alcançar a previsibilidade mútua (quem está fazendo o que e quando), a capacidade de especificar objetos e adaptar-se a eventos inesperados e ter um nível comum (linguagem e protocolos para garantir o compartilhamento de mesmos objetivos e informações) – (Ivanova *et al.*, 2016, tradução do autor).

Além das equipes híbridas de combate, os cenários elaborados para a guerra do futuro também preveem a presença de enxames de SMMA, os quais são considerados tecnologias disruptivas.

Enxames de sistemas robóticos têm o potencial para uma mudança ainda mais dramática e disruptiva nas operações militares. Enxames de sistemas robóticos podem trazer maior massa, coordenação, inteligência e velocidade para o campo de batalha, aumentando a capacidade dos combatentes de ganhar uma vantagem decisiva sobre seus adversários (Scharre, 2014b, tradução do autor).

A coordenação de enxames de sistemas autônomos é um desafio a ser enfrentado. Duas abordagens têm merecido atenção da comunidade científica: a cooperação e a colaboração.

A cooperação pode emular o comportamento de enxames observado na natureza entre um grande número de animais que executam tarefas simples baseadas no instinto, como formigas procurando alimento. As habilidades cognitivas e de comunicação para

cooperação são básicas e podem ser reduzidas a um pequeno número de comandos estímulo-resposta. A colaboração é uma forma mais intencional de trabalho em equipe, que requer sensoriamento e comunicação mais sofisticados, bem como a compreensão cognitiva de outros membros do enxame. O uso de enxames de sistemas autônomos pode fornecer capacidades de massa e manobra bastante aprimoradas, além de permitir o uso de sistemas com menor custo e em número suficientemente grande para proporcionar atrito e possivelmente sobrepujar quaisquer defesas tradicionais. Entretanto, para ser bem-sucedido, é provável que tais formações se comuniquem e reajam em velocidades e complexidades além da compreensão humana; isso introduz uma limitação que a doutrina deve abordar (Caton, 2015, tradução do autor).

Enxames inteligentes podem sobrecarregar as defesas adversárias, interferir de forma autônoma, enganar e empregar armas disruptivas não letais, como micro-ondas de alta potência, enquanto transmitem a posição de alvos inimigos a controladores humanos que podem autorizar engajamentos letais.

[...] a vanguarda da frente de batalha em todos os domínios seria não tripulada, conectada em rede, inteligente e autônoma (Work; Brimley, 2014, tradução do autor).

A ampliação das capacidades militares por meio do emprego de enxames de sistemas autônomos é promissora. Ao aliar baixo custo, massa e manobra, os enxames de sistemas autônomos podem alterar a balança do poder militar.

Enxames de sistemas não tripulados têm múltiplas aplicações defensivas e ofensivas com potencial para causar mudanças disruptivas nas operações militares. Enxames de VANT baratos, por meio de esforços cooperativos coordenados, poderiam fazer o trabalho de uma única aeronave multimissão de alto custo. Eles poderiam ampliar tanto a área de vigilância como o espectro, recorrendo a capacidades de comunicação e fusão de dados. Enxames de sistemas robóticos podem trazer maior massa, coordenação, inteligência, velocidade, resiliência e capacidade de resposta ao campo de batalha, aumentando a habilidade dos combatentes de ganhar uma vantagem decisiva sobre seus adversários (Bhalla, 2015, tradução do autor).

A guerra de enxames pode ser entendida como uma evolução na forma de combater, requerendo um elevado grau de autonomia e coordenação.

O enxame tem requisitos de organização e comunicação muito maiores do que a guerra de manobra. O número de manobras simultâneas e de combate a elementos individuais é significativamente maior (Scharre, 2014b, tradução do autor).

As trocas de informações entre os elementos do enxame podem ser usadas para aumentar a precisão da navegação e a identificação de ameaças.

O enxame, dotado de inteligência artificial, pode ter a capacidade de se reconfigurar e reagir a uma ameaça, mesmo perdendo alguns de seus indivíduos, redistribuindo as atribuições e os níveis de comando e coordenação.

Os exames de VANT têm, dentre as múltiplas possibilidades de uso, o emprego como minas aéreas, impedindo o tráfego aéreo em uma determinada região, podendo também ser utilizado em sistemas de defesa contra mísseis, com a vantagem de ter melhor relação custo-benefício que um sistema de mísseis antimísseis. Além disso, um ataque de enxames de VANT de baixo custo pode saturar as defesas inimigas, obrigando o inimigo a consumir seus meios de defesa como mísseis e munições. Esses enxames podem realizar ataques de guerra eletrônica, neutralizando as defesas inimigas.

Veículos terrestres não tripulados podem ser a vanguarda de um avanço, permitindo aos robôs realizarem o “contato” em um “movimento para o contato”. Veículos robôs poderiam ser usados para expulsar o inimigo, flanqueá-lo ou cercá-lo ou lançar manobras de finta. Veículos não tripulados poderiam ser lançados por linhas inimigas em missões suicidas (Scharre, 2014b, tradução do autor).

Por outro lado, a necessidade de comunicação entre os indivíduos do enxame e destes com os outros elementos da rede, inclusive com o centro de comando, pode se tornar alvo de ações inimigas (Work; Brimley, 2014).

A ação de *hackers* é uma vulnerabilidade que deve ser levada em conta no desenvolvimento da doutrina e da tecnologia do sistema autônomo, no entanto

“vulnerabilidades cibernéticas não são exclusivas de sistemas não tripulados” (Scharre, 2014b, tradução do autor).

Outras contramedidas têm sido desenvolvidas, como armas de micro-ondas que destroem sistemas eletrônicos.

Armas de micro-ondas de alta potência que destroem a eletrônica também têm um tremendo potencial. Essas armas poderiam desarmar armas inimigas e sistemas eletrônicos por meios não letais e poderiam potencialmente ser empregadas com um maior grau de autonomia em sistemas não tripulados (Caton, 2015, tradução do autor).

## Conclusões

Este trabalho destaca o uso intensivo da tecnologia aliado ao uso de doutrinas militares inovadoras como diferencial do combate no âmbito dos SMMA, constituindo a verdadeira inovação militar, conjugando tecnologia e doutrina. Dessa forma, a doutrina é chave para a efetiva utilização dos SMMA, sendo tão importante quanto o próprio desenvolvimento tecnológico.

Os SMMA estão modificando a arte da guerra, influindo em diferentes dimensões do conflito, automatizando o combate, reduzindo os tempos de ação e reação e aumentando a profundidade das operações. A doutrina militar, portanto, está sofrendo grande impacto. As FA terão seus efetivos reduzidos e deslocados das zonas de combate para regiões mais seguras, permitindo que forças estratégicas se posicionem fora do teatro de operações. Os SMMA aprofundarão os conflitos e ampliarão a zona de combate.

A redução dos orçamentos militares e o elevado custo do combatente e dos sistemas tradicionais de combate mais modernos – como aviões de combate, carros de combate, navios e submarinos – têm catalisado o processo de desenvolvimento dos SMMA, os quais são, em geral, menos custosos. Nesse sentido, observa-se ainda o elevado custo do soldado em combate, em treinamento e na reserva (ou reformado), além dos custos de saúde da família militar, os quais geram compromissos de

longa duração para as nações. Nesse sentido, os SMMA se apresentam como uma alternativa viável e, potencialmente, menos custosa de manutenção do poder militar frente à redução dos efetivos militares.

Os SMMA aumentam a capacidade de sensoriamento e de processamento de informações, podendo operar em rede, integrados a sistemas computacionais, a veículos e a soldados. Por conseguinte, a velocidade de resposta a ameaças e a deflagração de ataques serão mais rápidas. A inteligência artificial é fulcral no emprego dos SMMA, ampliando a consciência situacional e acelerando o processo decisório.

Equipes híbridas de combate, constituídas por soldados e SMMA, serão capazes de atuar com elevada autonomia, velocidade e precisão. A doutrina militar, entretanto, terá um papel fundamental na formulação de novos conceitos operacionais e táticos.

Enxames de SMMA proporcionarão grande capacidade de massa, manobra e velocidade às operações ofensivas e defensivas. Uma possibilidade de utilização desses enxames é como minas aéreas ou como defesa antimísseis. Além disso, enxames de SMMA de baixo custo poderão ser mais efetivos que um único SMMA de custo elevado.

À medida que a cultura das FA e da comunidade mundial, porém, for mudando, haverá uma tendência em aumentar a letalidade dos SMMA, posto que, na atualidade, questões éticas e legais quanto ao uso de sistemas autônomos letais permanecem sem resposta.

As atividades logísticas terão grande impulso com o uso dos SMMA, sobretudo alavancadas pela dualidade notória dessa tecnologia, a qual desperta grande interesse por parte das empresas logísticas civis.

Comboios com suprimentos militares poderão ser completamente autônomos. O grau de autonomia, contudo, aumentará ao longo do tempo. Inicialmente, veículos autônomos seguidores comporão comboios que serão liderados por um veículo tripulado ou remotamente pilotado. Veículos remotamente pilotados de baixo custo poderão seguir à frente de comboios em área com elevado risco de minas e explosivos improvisados de modo a proteger as vidas humanas e os recursos materiais presentes no comboio.

*Kits* para conversão de veículos tripulados em autônomos são desenvolvidos como alternativa de baixo custo e visam ao aproveitamento do material e da cadeia logística de manutenção e suprimento existentes.

Veículos aéreos não tripulados podem ser empregados em operações logísticas, especialmente no reabastecimento de unidades dispersas no terreno ou em regiões de grande perigo.

O resgate de feridos e os primeiros socorros são um campo de grande potencial para o emprego dos SMMA aumentando a eficiência do resgate e reduzindo o risco dessas missões.

Constata-se, assim, a necessidade de desenvolvimento doutrinário, científico, tecnológico e de recursos humanos voltados para sistemas mecatrônicos autônomos militares. 

## Referências

ACKERMAN, E. **Industries urges United Nations to ban lethal autonomous weapons in new open letter**. Spectrum IEEE, 21 ago 2017. Disponível em: <<https://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/military-robots/industry-urges-united-nations-to-ban-lethal-autonomous-weapons-in-new-open-letter>>. Acesso em: 10 jul 2023.

AWTAR, S.; BERNARD C.; BOKLUND, N.; MASTER, A.; UEDA, D.; CRAIG, K. **Mechatronic design of ball-on-plate balancing system**. Mechatronics, v.12, p. 217-228, 2002. Disponível em: <[http://www.psdl.ingen.umich.edu/pdf/ballon-plate\\_mechatronics.pdf](http://www.psdl.ingen.umich.edu/pdf/ballon-plate_mechatronics.pdf)>. Acesso em: 12 jun 2023.

BHALLA, P. **Emerging Trends in Unmanned Aerial Systems**. Scholar Warrior, p. 86-94, 2015. Disponível em: <[http://www.claws.in/images/journals\\_doc/1119543205\\_Emergingtrendsinunmannedaerialsystems.pdf](http://www.claws.in/images/journals_doc/1119543205_Emergingtrendsinunmannedaerialsystems.pdf)>. Acesso em: 10 jul 2023.

BLACK KNIGHT. **Military Today**. Disponível em: <[http://www.military-today.com/apc/black\\_knight.htm](http://www.military-today.com/apc/black_knight.htm)>. Acesso em: 20 jul 2023.

BRASIL. EME. **EB20-C-07.001: Catálogo de Capacidades do Exército 2015-2035**. Brasília, DF, 2015.

BRASIL. EME. **EB20-MC-10.214: Vetores Aéreos da Força Terrestre**. 1. ed., Brasília, DF, 2014.

BRASIL. EME. **EB20-MC-10.214: Vetores Aéreos da Força Terrestre**, 2. ed., Brasília, DF, 2020.

BRASIL. EME. **Plano Estratégico do Exército 2020-2023**. Brasília, DF, 2019.

BRASIL. EME. Portaria – EME/C Ex nº 971, de 10 de fevereiro de 2023. Aprova o Manual de Fundamentos Conceito Operacional do Exército Brasileiro – **Operações de convergência 2040** (EB20-MF-07.101). 1. ed., 2023.

BRASIL. **Estratégia Nacional de Defesa**. Brasília, DF, 2016b.

BRASIL. **Política Nacional de Defesa**. Brasília, DF, 2016a.

CALDEIRA, Aldélio Bueno. **Sistemas Mecatrônicos e a Guerra do Futuro**. 2018. F. 75. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Ciências Militares) – Escola de Comando e Estado-Maior do Exército, Rio de Janeiro, 2018.

CATON, J. L. **Autonomous weapon systems**: a brief survey of developmental, operational, legal, and ethical issues. Strategic Studies Institute and U.S. Army War College Press. ISBN 1-58487-718-9, 2015.

ETZIONI, A.; ETZIONI, O. **Os prós e os contras dos sistemas de armas autônomos**. Military Review: Brazilian, Fort Leavenworth, Kansas, Estados Unidos, p. 1-11, 2017.

IVANOVA, K.; GALLASCH, G. E.; JORDANS, J. **DST-Group-TN-1573 AR-016- 721**: Automated and Autonomous Systems for Combat Service Support: Scoping Study and Technology Prioritization. Land Division, Defence Science and Technology Group, Department of Defence, Australian Government, 2016. Disponível em: <<https://www.dst.defence.gov.au/sites/default/files/publications/documents/DST-Group-TN-1573.pdf>>. Acesso em: 10 jul 2023.

MARTINIC, G. **Glimpses of future battlefield medicine** – the proliferation of robotic surgeons and unmanned vehicles and technologies. Journal of Military and Veterans' Health, v. 22, n. 3, p. 4-12, 2014.

MARTINIC, G. **The Proliferation, Diversity and Utility of Ground-based Robotic Technologies**. Canadian Military Journal, v. 14, n. 4, p. 48-53, 2014b.

OLIVEIRA, Luiz Celso de. **A robótica e a força terrestre**. Monografia – Especialização em Ciências Militares – Escola de Comando e Estado-Maior do Exército, Rio de Janeiro. 1993.

PRIGG, M. **Who goes there? Samsung unveils robot sentry that can kill from two miles away**. Daily Mail Online. 2014. Disponível em: <<http://www.dailymail.co.uk/science/tech/article-2756847/Who-goes-Samsung-reveals-robot-sentry-set-eye-North-Korea.html>>. Acesso em: 20 jul 2023.

SAPATY, P. S. **Military Robotics**: Latest Trends and Spatial Grasp Solutions. International Journal of Advanced Research in Artificial Intelligence, v. 4, n.4, p.918, 2015. Disponível em: <[https://thesai.org/Downloads/IJARAI/Volume4No4/Paper\\_2Military\\_Robotics\\_Latest\\_Trends\\_and\\_Spatial\\_Grasp\\_Solutions.pdf](https://thesai.org/Downloads/IJARAI/Volume4No4/Paper_2Military_Robotics_Latest_Trends_and_Spatial_Grasp_Solutions.pdf)>. Acesso em: 10 jun 2023.

SCHARRE, P. **Robotics on the Battlefield Part I**: Range, Persistence and Daring. Center for New American Security. 2014. Disponível em: <<https://www.cnas.org/publications/reports/robotics-on-the-battlefield-part-i-range-persistence-and-daring>>. Acesso em: 10 jun 2023.

SCHARRE, P. **Robotics on the Battlefield Part II The Coming Swarm**. Center for New American Security. 2014b. Disponível em: <<https://www.cnas.org/publications/reports/robotics-on-the-battlefield-part-ii-the-coming-swarm>>. Acesso em: 10 jun 2023.

STRASSBURGER, E.; ANNES, D. B. **Sistema de Munições Remotamente Pilotadas**. Escotilha do Comandante, Ano VII, Nr 155, 9 ago 2022. Disponível em: <<https://cibld.eb.mil.br/index.php/periodicos/escotilha-do-comandante/655-escotilha-155>>. Acesso em: 26 Jul 23.

UNOG. **2017 Group of Governmental Experts on Lethal Autonomous Weapons Systems (LAWS)**, 2017. Disponível em: <[https://www.unog.ch/80256EE600585943/\(httpPages\)/F027DAA4966EB9C7C12580CD0039D7B5](https://www.unog.ch/80256EE600585943/(httpPages)/F027DAA4966EB9C7C12580CD0039D7B5)>. Acesso em: 6 jul 2023.

WORK, R. O.; BRIMLEY, S. **20YY**: Preparing for War in the Robotic Age. Center for New American Security. 2014. Disponível em: <<https://www.cnas.org/publications/reports/20yy-preparing-for-war-in-the-robotic-age>>. Acesso em: 5 jun 2023.

ZURIARRAIN, J. M.; POZZI, S. **Elon Musk encabeça uma petição à ONU para proibir os ‘robôs soldado’**. El País, 24 ago 2017. Disponível em: <[https://brasil.elpais.com/brasil/2017/08/21/tecnologia/1503310591\\_969485.html](https://brasil.elpais.com/brasil/2017/08/21/tecnologia/1503310591_969485.html)>. Acesso em: 10 jun 2023.