

ARTIGO

Estudo de Prospectiva sobre Tecnologias de Biosensores: aplicações de uso dual nos âmbitos civil e militar

Foresight Study on Biosensor Technologies: dual-use applications in civilian and military domains

RESUMO

Este estudo prospectivo analisa o desenvolvimento de tecnologias de biosensores com potencial de uso dual nos âmbitos civil e militar. Busca-se antecipar tendências, avaliar níveis de maturidade tecnológica e mapear aplicações voltadas ao monitoramento da saúde, ao aprimoramento do desempenho físico e à prontidão operacional. Os biosensores evoluíram significativamente, passando de dispositivos rudimentares para sistemas vestíveis, implantáveis e ingeríveis, com capacidade de monitoramento fisiológico em tempo real. Avanços como a miniaturização, a incorporação de inteligência artificial e o uso de comunicações sem fio ampliam sua aplicabilidade em ambientes operacionais exigentes. No contexto militar, essas tecnologias permitem o monitoramento contínuo de indicadores como fadiga, estresse e risco de lesão. Já na esfera civil, transformam práticas em medicina personalizada, saúde ocupacional, ciências do esporte e telessaúde. A metodologia emprega varredura de horizonte tecnológico (horizon scanning), análise de tendências em patentes e publicações, avaliação do Nível de Maturidade Tecnológica (Technology Readiness Level – TRL) e as ferramentas SWOT e PESTEL. Os resultados indicam a liderança dos Estados Unidos no desenvolvimento da área, com destaque para sensores neurofisiológicos e plataformas multimodais. Projeções para 2030–2040 incluem cenários que vão desde integração ética plena até desafios relacionados à privacidade, riscos cibiológicos e governança do uso dual. A exploração responsável dessas tecnologias exige investimentos coordenados em pesquisa, cooperação interdisciplinar e marcos éticos e regulatórios robustos. Conclui-se que os biosensores constituem ativos estratégicos para a construção de sistemas de saúde e defesa mais resilientes e orientados por dados.

Palavras-chave: Monitoramento fisiológico. Dispositivos eletrônicos vestíveis. Desempenho humano.

ABSTRACT

This foresight study examines the advancement of biosensor technologies with dual-use potential in both civilian and military contexts. The objective is to anticipate technological trends, assess levels of technological maturity, and identify relevant applications aimed at health monitoring, physical performance enhancement, and operational readiness. Biosensors have undergone significant evolution, transitioning from rudimentary physiological detectors to sophisticated wearable, implantable, and ingestible systems capable of real-time physiological monitoring. Key advancements include device miniaturization, the integration of artificial intelligence, and the adoption of wireless communication protocols, which collectively expand their applicability in demanding operational environments. In military settings, these technologies enable continuous monitoring of critical indicators such as fatigue, stress, and injury risk. In civilian domains, biosensors are reshaping practices in personalized medicine, occupational health, sports science, and telehealth. The methodological framework incorporates horizon scanning, trend analysis of patents and scientific publications, assessment of Technology Readiness Levels (TRLs), and strategic tools such as SWOT and PESTEL analyses. The findings indicate that the United States leads the field in terms of patent filings and scholarly output, with particular emphasis on neurophysiological sensors and multimodal platforms. Future scenarios projected for the 2030–2040 horizon range from fully integrated ethical adoption across sectors to challenges related to data privacy, cyber-biological threats, and dual-use governance. Responsible advancement of these technologies requires coordinated investments in research and development, interdisciplinary collaboration, and the establishment of robust ethical and regulatory frameworks. The study concludes by underscoring the strategic importance of biosensors in enabling resilient, data-driven health and defense systems.

Keywords: Physiological monitoring. Wearable Electronic Devices. Human Performance.

Runer Augusto Marson

Escola Preparatória de Cadetes do Exército – EsPCEx, Campinas, SP, Brasil

Email: adj2-nupae@espceeb.mil.br

ORCID:

<https://orcid.org/0000-0002-5248-7717>

Alexandro da Silva e Silva

Centro de PD&I - FAMA TECH, Manaus, AM, Brasil

Email: alexandro@famagru.com

ORCID:

<https://orcid.org/0009-0009-7625-035X>

Alexandre Bruno da Silva e Silva

Centro de PD&I - FAMA TECH, Manaus, AM, Brasil

Email: bruno.silva@famagru.com

ORCID:

<https://orcid.org/0009-0006-6170-9226>

Received: **04 Jun 2025**

Reviewed: **Jun 2025**

Received after revised: **25 Jun 2025**

Accepted: **27 Jun 2025**



RAN

Revista Agulhas Negras

eISSN (online) **2595-1084**

<http://www.ebrevistas.eb.mil.br/aman>



<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



1 Introdução

Os biossensores representam uma classe transformadora de dispositivos analíticos projetados para detectar sinais biológicos e convertê-los em dados mensuráveis. Esses sistemas geralmente integram um biorreceptor, um transdutor e um componente eletrônico responsável pelo processamento e transmissão do sinal. Inicialmente restritos à área de diagnóstico biomédico, os biossensores expandiram-se para diversos campos como saúde personalizada, desempenho esportivo, segurança ocupacional e, de forma crescente, aplicações militares (Friedl *et al.*, 2018).

No contexto civil, os biossensores são amplamente utilizados para monitoramento de sinais vitais, manejo de doenças crônicas, reabilitação física e melhoria do desempenho atlético (Friedl *et al.*, 2018; Aidman, 2020). Em ambientes militares, seu potencial é ainda mais evidente: os biossensores oferecem dados contínuos e em tempo real sobre o estado fisiológico e cognitivo dos indivíduos, auxiliando na tomada de decisões em situações de alto risco (Marson & Guimarães, 2021; Silva, 2022). Esses dispositivos permitem a detecção precoce de fadiga, desidratação, sobrecarga cognitiva e risco de lesões, fatores cruciais para manter a prontidão operacional e a sobrevivência em cenários complexos de missão.

A prospectiva tecnológica desempenha papel central na antecipação de transformações tecnológicas e no direcionamento do planejamento estratégico. Ao analisar tendências, níveis de maturidade e caminhos de uso dual, esses estudos subsidiam decisões informadas em setores governamentais, de defesa, saúde e indústria (Gibson *et al.*, 2018; Alpysbayev & Alpysbayev, 2023). No caso dos biossensores, a convergência entre biotecnologia, inteligência artificial e comunicação digital gera tanto oportunidades inéditas quanto desafios éticos, jurídicos e de segurança cada vez mais complexos.

Compreender a natureza dual dos biossensores é especialmente relevante no atual cenário geopolítico. Dispositivos desenvolvidos para monitoramento de saúde em contextos civis podem ser rapidamente adaptados para fins militares, ampliando a eficácia de combatentes ou, por outro lado, servindo como ferramentas de vigilância e controle.

Essa convergência civil-militar destaca a importância de marcos de governança proativos e da autonomia estratégica no desenvolvimento e na aplicação de tecnologias biosensoriais (Friedl *et al.*, 2018).

À medida que essas tecnologias se tornam mais maduras e integradas aos sistemas civis e militares, aumenta a urgência de esforços coordenados em prospectiva estratégica e supervisão ética. Assim sendo, esta investigação científica tem como objetivo central oferecer uma análise abrangente e prospectiva sobre as tecnologias de biossensores, com ênfase especial no potencial de uso dual, nas



trajetórias de inovação e nas implicações para políticas públicas. Busca-se antecipar tendências e avaliar como tais tecnologias podem redefinir o monitoramento do desempenho humano e apoiar a tomada de decisão em contextos civis e de defesa, tanto em situações de paz quanto em ambientes de conflito.

2 Percurso Metodológico

Para projetar a trajetória tecnológica e as implicações de uso dual das tecnologias de biossensores nos domínios civil e militar, este estudo de prospectiva adota um arcabouço metodológico multimétodo, combinando abordagens qualitativas e quantitativas. A metodologia empregada inclui varredura de horizonte tecnológico (*horizon scanning*), avaliação do nível de maturidade tecnológica, análise de tendências e ferramentas estratégicas como as matrizes *SWOT* e *PESTEL*. Essa abordagem integrativa assegura uma perspectiva robusta e antecipatória, alinhada tanto à dinâmica da inovação quanto às exigências operacionais.

2.1 Varredura de Horizonte Tecnológico (*Horizon Scanning*)

Foi realizada uma varredura sistemática em bases científicas (como *PubMed* e *ScienceDirect*), plataformas tecnológicas (*IEEE Xplore*, *SpringerLink*) e repositórios de patentes (*LENS*, *WIPO*). A busca concentrou-se em palavras-chave como “biosensor”, “monitoramento fisiológico”, “dispositivo vestível”, “desempenho militar” e “tecnologia de uso dual” (“*biosensor*,” “*physiological monitoring*,” “*wearable device*,” “*military performance*,” and “*dual-use technology*”). A análise evidenciou um aumento significativo nas publicações e registros de patentes desde o início dos anos 2000, com destaque para sensores neurofisiológicos, neuromecânico e sistemas multimodais que combinam monitoramento físico e cognitivo (Marson & Guimarães, 2021).

2.2 Avaliação do Nível de Maturidade Tecnológica (*Technology Readiness Level – TRL*)

Para avaliar o grau de maturidade das inovações em biossensores, este estudo utilizou o modelo de *TRL*. Cada tecnologia foi classificada em uma escala de *TRL 1* (princípios básicos observados) até *TRL 9* (sistema plenamente comprovado em ambiente operacional). A maioria dos biossensores atualmente utilizados para monitoramento militar situa-se entre os níveis *TRL 5* e *7*, com protótipos testados em ambientes controlados, mas ainda não plenamente integrados aos procedimentos operacionais padrão.



2.3 Análises SWOT e PESTEL

Para analisar a viabilidade estratégica, aplicaram-se as ferramentas *SWOT* (*Strengths, Weaknesses, Opportunities e Threats*) e *PESTEL* (Político, Econômico, Social, Tecnológico, Ambiental e Legal). As avaliações *SWOT* destacaram as forças dos biossensores no treinamento personalizado e na vigilância de saúde em tempo real, ao passo que as fraquezas incluem preocupações com privacidade de dados e limitações energéticas em sistemas vestíveis. Já a análise *PESTEL* ofereceu um panorama mais amplo, examinando lacunas regulatórias, tendências de mercado, riscos éticos e implicações geopolíticas das tecnologias sensoriais de uso dual.

Ao triangular diferentes fontes de dados e ferramentas analíticas, esta metodologia visa fornecer uma análise de prospectiva tecnológica abrangente, que não apenas identifica tendências-chave, mas também antecipa desafios e considerações estratégicas relevantes para ecossistemas civis e militares.

3 Resultados e Discussões

3.1 Estado atual das tecnologias de biossensores

As tecnologias de biossensores evoluíram rapidamente nas últimas duas décadas, passando de instrumentos restritos ao laboratório para dispositivos compactos, de fácil uso e passíveis de implantação em campo. Esses sistemas estão cada vez mais integrados a dispositivos vestíveis e plataformas conectadas, permitindo o monitoramento fisiológico e ambiental em tempo real (Marson & Guimarães, 2021; Friedl, 2018). Atualmente, suas aplicações abrangem os setores de saúde, ciência do esporte, segurança ocupacional e, com ênfase crescente, operações militares.

3.2 Tipos de Biossensores

Diversas categorias de biossensores estão em desenvolvimento ou já são utilizadas operacionalmente (Marson *et al.*, 2023; Friedl *et al.*, 2018), entre as quais se destacam:

- Eletromiografia (EMG): Sensores EMG detectam a atividade elétrica produzida pelos músculos esqueléticos. São amplamente utilizados na ergonomia, reabilitação e, cada vez mais, no ambiente militar para avaliar fadiga muscular e desempenho motor sob carga física.

- Eletroencefalografia (EEG): Sensores EEG medem a atividade elétrica cerebral e são empregados para avaliar carga cognitiva, níveis de estresse e fadiga mental. Seu uso potencial em apoio à tomada de decisão tática e prontidão cognitiva tem despertado crescente interesse em instituições de defesa.



- Eletrocardiografia (ECG): Biossensores ECG monitoram a função cardíaca e são essenciais para detecção de estresse, intensidade de esforço e alertas precoces de sobrecarga cardiovascular durante atividades intensas.

- Unidades de Medição Inercial (*Inertial Measurement Unit - IMU*): Incluem acelerômetros e giroscópios para rastreamento de movimento e análise biomecânica. São cruciais para estudos de marcha, transporte de carga e avaliação da eficiência do movimento tanto em atletas quanto em militares.

- Biossensores Bioquímicos e Ópticos: Detectam biomarcadores como glicose, lactato ou estado de hidratação através de saliva, suor ou fluido intersticial. Estão emergindo como ferramentas tanto para manejo de doenças crônicas quanto para diagnóstico em campo.

- Atividade Eletrodérmica (*Electrodermal Activity - EDA*): Também conhecidos como sensores de resposta galvânica da pele, monitoram alterações de condutância cutânea associadas ao estresse. Quando combinados à variabilidade da frequência cardíaca, oferecem insights sobre o estado psicofisiológico sob estresse operacional.

3.3 Maturidade Tecnológica e Implantação

A maioria dos biossensores disponíveis comercialmente encontra-se entre os níveis *TRL* 6 e 8, o que indica validação em ambientes relevantes ou proximidade de plena capacidade operacional. No entanto, biossensores com especificações militares, como transmissão segura de dados, longa duração de bateria e resistência ambiental, ainda se situam entre *TRL* 4 e 6, indicando validação experimental, mas integração limitada a operações de campo (Pohanka, 2019; Rausch *et al.*, 2022).

Plataformas vestíveis avançadas, como *BITalino*, *Hexoskin* e *Zephyr BioHarness*, foram testadas em contextos militares e de pesquisa, oferecendo aquisição multicanal (ECG, EMG, EEG, respiração, temperatura) e transmissão de dados em tempo real. Ainda assim, persistem desafios relacionados ao ruído do sinal, interoperabilidade com sistemas de comunicação militares e segurança cibernética.

3.4 Aplicações no Setor Civil

Os biossensores vêm sendo amplamente utilizados em diversos setores, destacando-se principalmente nas áreas da saúde, ciência do esporte e segurança ocupacional. No campo da saúde, essas tecnologias possibilitam o monitoramento remoto de condições crônicas, como arritmias cardíacas e diabetes, promovendo diagnósticos precoces e ampliando a qualidade do cuidado a populações idosas ou com mobilidade reduzida (Dalloul *et al.*, 2023). Na ciência do esporte, os biossensores têm sido empregados para acompanhar a carga de treinamento, a temporização da



ativação muscular, a prevenção de lesões e o fornecimento de feedback objetivo sobre o desempenho físico (Cheng *et al.*, 2024). Já no contexto da segurança ocupacional, essas tecnologias contribuem significativamente para a detecção precoce de fadiga, a análise postural em tempo real e o monitoramento da exposição a riscos em ambientes industriais exigentes, como mineração, construção civil e aviação (Malasinghe *et al.*, 2019).

Assim sendo, a crescente adoção dos biossensores em contextos clínicos e não clínicos decorre, em grande parte, da acessibilidade desses dispositivos, da facilidade de uso por parte dos profissionais e usuários finais e da sua capacidade de gerar grandes volumes de dados fisiológicos de forma contínua e não invasiva. Esses dados, por sua vez, alimentam sistemas de análise preditiva capazes de identificar padrões fisiológicos associados a riscos, patologias ou variações de desempenho, contribuindo para intervenções precoces, estratégias personalizadas e otimização da saúde e do rendimento físico em múltiplos contextos de aplicação.

3.5 Aplicações no Setor Militar

No contexto da defesa, os biossensores desempenham um papel estratégico cada vez mais relevante, com aplicações voltadas à otimização do desempenho físico e cognitivo dos militares (Marson & Guimarães, 2021). Entre os principais usos destacam-se o monitoramento da sobrecarga fisiológica, da fadiga neuromuscular e da resiliência cardiovascular durante treinamentos intensivos e operações de campo (Almer *et al.*, 2022). Através da coleta contínua de dados biométricos, esses dispositivos possibilitam o acompanhamento em tempo real da prontidão física e da tolerância ao estresse físico, contribuindo para a prevenção de lesões e o ajuste das demandas operacionais de forma personalizada.

Além do desempenho físico, os biossensores também têm sido utilizados para monitorar a prontidão cognitiva dos combatentes, por meio da análise da atividade elétrica cerebral e da variabilidade da frequência cardíaca. Esses indicadores fornecem subsídios para avaliar o estado de alerta, a consciência situacional e a fadiga mental, elementos críticos para a tomada de decisão sob pressão (Laarni *et al.*, 2019). Em paralelo, o monitoramento psicofisiológico contínuo permite a identificação de limiares de estresse e fadiga, possibilitando a realocação de tarefas de maneira adaptativa, com o objetivo de preservar a integridade física e mental dos militares e manter a eficiência operacional (Veenstra *et al.*, 2009).

No âmbito da medicina de campanha e das operações especiais, os biossensores portáteis ou discretos, incluindo dispositivos aderidos à pele ou até mesmo implantáveis, possibilitam a transmissão remota de sinais vitais para centros de comando ou equipes de resposta rápida, otimizando triagens e intervenções em tempo real. Essa capacidade é particularmente valiosa em



ambientes hostis ou de difícil acesso, onde a tomada de decisão clínica precisa ser rápida e precisa. Embora a integração desses sensores a equipamentos militares padronizados, como capacetes, coletes e uniformes inteligentes, já esteja em andamento, sua implementação em larga escala ainda enfrenta desafios logísticos, éticos e técnicos que demandam soluções interdisciplinares e normativas específicas (Kumar, 2024).

4 Tendências e tecnologias emergentes

A evolução das tecnologias de biossensores tem sido cada vez mais moldada pela convergência entre disciplinas como engenharia biomédica, inteligência artificial (IA), ciência de dados, nanotecnologia e comunicações sem fio. Essas interações estão impulsionando uma nova geração de biossensores inteligentes, não apenas mais precisos e compactos, mas também contextualmente sensíveis, adaptáveis e capazes de análises em tempo real em ambientes operacionais de alta complexidade.

4.1 Integração com Inteligência Artificial (IA) e Aprendizado de Máquina

Uma das tendências mais transformadoras é a incorporação de algoritmos de IA e aprendizado de máquina (*Machine Learning*) às plataformas de biossensores. Por meio da análise de padrões fisiológicos complexos, a IA aumenta o poder preditivo dos dados capturados, permitindo a detecção antecipada de fadiga, estresse ou risco musculoesquelético. Por exemplo, classificadores supervisionados (como máquinas de vetor de suporte e regressão logística) têm apresentado alta acurácia na identificação de estados cognitivos e emocionais com base em conjuntos de dados biométricos multimodais de militares em treinamento (Aidman, 2020).

Essas ferramentas possibilitam sistemas de retroalimentação adaptativa nos quais os biossensores não apenas registram dados, mas atuam como elementos integrados a sistemas de apoio à decisão, alertando automaticamente comandantes, profissionais de saúde ou os próprios usuários sobre estados de risco e permitindo intervenções proativas.

4.2 Biossensores Sem Bateria e com Captação de Energia

Hoje, verifica-se o surgimento de biossensores que operam sem baterias, alimentados por mecanismos de captação de energia, como geradores termoelétricos (a partir do calor corporal), materiais piezoelétricos (ativados por movimento) ou carregamento indutivo. Esses sistemas autônomos estendem a longevidade operacional e eliminam períodos de inatividade para recarga, aspectos críticos para missões de longa duração e ambientes remotos (Farzin *et al.*, 2024).



Essas características são essenciais para o monitoramento contínuo de baixo perfil, especialmente em dispositivos vestíveis e implantáveis.

4.3 Plataformas Multimodais e Sensores Híbridos

Os sistemas de biossensores do futuro tendem a ser cada vez mais multimodais, combinando sinais físicos (ex.: movimento, postura), fisiológicos (ex.: variabilidade da frequência cardíaca, condutância da pele) e ambientais (ex.: calor, altitude) em uma única plataforma integrada (Ray *et al.*, 2019). Esses sistemas híbridos oferecem uma visão holística do desempenho e do risco, particularmente relevante no treinamento militar, onde estressores ambientais interagem com cargas físicas e cognitivas.

Por exemplo, a combinação de *IMUs* com sensores de EMG e EEG pode revelar não apenas o desempenho biomecânico e neuromecânico, mas também o controle neuromuscular e o esforço cognitivo durante tarefas complexas.

4.4 Miniaturização e Computação de Borda (*Edge Computing*)

Graças aos avanços em nanomateriais e microeletrônica, os biossensores estão cada vez mais miniaturizados, conformáveis à pele e não invasivos. Dispositivos vestíveis no formato de adesivos, têxteis ou cápsulas ingeríveis já oferecem captura de sinais biomédicos de alta resolução sem comprometer a mobilidade do usuário (Antony, 2024).

Por conseguinte, muitos sistemas de biossensores estão incorporando capacidades de computação de borda, processando dados localmente no próprio dispositivo em vez de depender de servidores em nuvem. Isso reduz a latência, melhora a privacidade e permite a detecção de anomalias em tempo real, o que é vital em contextos operacionais com demandas críticas de tempo.

4.5 Interfaces Cérebro-Computador e Biointerfaces

O desenvolvimento de interfaces cérebro-computador (*Brain Computer Interface - BCI*) representa outra fronteira tecnológica com implicações tanto para reabilitação quanto para aprimoramento operacional. As *BCIs* podem monitorar a atividade cortical em busca de sinais de fadiga mental, prontidão para tomada de decisão ou sobrecarga cognitiva (He *et al.*, 2022). Em cenários táticos, essas interfaces poderão evoluir para ferramentas de aumento da capacidade de comando, permitindo a operação de sistemas sem o uso das mãos ou o sinalamento automático de estados cognitivos superiores.



Outras biointerfaces, como tatuagens eletrônicas e dispositivos epidérmicos, estão redefinindo a relação física entre humanos e máquinas, permitindo que os biossensores sejam integrados diretamente à pele sem causar desconforto ou serem perceptíveis.

4.6 Oportunidades de Uso Dual e Riscos Emergentes

O potencial de uso dual das tecnologias de biossensores continua em franca expansão. De maneira positiva, dispositivos originalmente desenvolvidos para aplicações na medicina esportiva ou na saúde personalizada podem ser prontamente adaptados para o monitoramento fisiológico e cognitivo de militares em ambientes operacionais reais (Marson & Guimarães, 2021; Velayutham *et al.*, 2024). Em sentido inverso, inovações oriundas do setor de defesa, projetadas para resistir a condições extremas e fornecer dados em tempo real, podem ser transferidas para contextos civis, contribuindo para a gestão de desastres, o cuidado de populações idosas e a promoção da segurança ocupacional em setores industriais de alto risco (Velayutham *et al.*, 2024). Essa interconectividade entre domínios amplia as possibilidades de aplicação e potencializa os benefícios sociais, econômicos e operacionais das soluções biosensoriais.

Entretanto, essa convergência também impõe novos desafios e riscos. A fusão entre dados biométricos, comportamentais e de geolocalização amplia consideravelmente a exposição dos usuários à vigilância constante e a possíveis ataques ciberfísicos, exigindo políticas rigorosas de governança de dados (Marson & Guimarães, 2021; Hu, 2013). Ademais, o monitoramento contínuo de indivíduos, especialmente em contextos hierarquizados como o militar, levanta dilemas éticos relevantes relacionados à autonomia pessoal, ao consentimento informado e à preservação da privacidade (Gomathy & Geetha, 2024). Soma-se a isso o problema da fragmentação tecnológica: à medida que diferentes fabricantes e plataformas proliferam, torna-se urgente o estabelecimento de padrões globais que assegurem a interoperabilidade entre dispositivos, a segurança das comunicações e a aplicação ética das informações sensíveis produzidas por essas tecnologias (Gomathy & Geetha, 2024).

Essas tendências reforçam a importância de desenvolver marcos regulatórios que equilibrem os incentivos à inovação com salvaguardas para a dignidade humana, a integridade operacional e a autonomia estratégica.

5 Cenários de prospectiva

Este estudo prospectivo considera que, no intervalo entre 2030 e 2040, a consolidação de biossensores de próxima geração ocorrerá de forma sistêmica, integrando-se tanto a estruturas civis



de saúde quanto a sistemas operacionais militares. Com base na avaliação de sinais fracos e tendências emergentes, são propostos três cenários (otimista, realista e pessimista), construídos segundo a interação entre vetores tecnológicos, regulamentações futuras, dinâmicas de mercado e possíveis reconfigurações estratégicas no cenário internacional. Esses cenários têm o propósito de apoiar o planejamento estratégico e a formulação de políticas, ilustrando desdobramentos plausíveis a partir das decisões tecnológicas, éticas e institucionais tomadas no presente (Marson & Guimarães, 2021; Marson *et al.*, 2025).

5.1 Cenário Otimista: Integração Plena e Inovação Ética

Com base em análises conduzidas neste estudo, até 2040, os biossensores serão adotados de forma universal nos setores de saúde, esportes e defesa, com protocolos de interoperabilidade robustos e acesso equitativo assegurado por meio de normas internacionais. Nesta visão, biossensores vestíveis e implantáveis tornam-se componentes fundamentais de sistemas de saúde de precisão, permitindo diagnóstico precoce, tratamento personalizado e monitoramento preditivo de condições físicas e mentais.

Mantendo a mesma linha de raciocínio, no que tange ao domínio militar, os biossensores estarão plenamente integrados a sistemas de soldados de nova geração. Uniformes inteligentes, capacetes e exoesqueletos contarão com análises em tempo real para monitoramento de fadiga, hidratação e risco de lesões. Ferramentas de apoio à decisão, impulsionadas por IA e alimentadas por dados biosensoriais, auxiliarão comandantes em planejamento de missões, alocação de recursos e triagem de feridos. Estruturas éticas e mecanismos globais de governança estarão em vigor para proteger a privacidade, garantir o consentimento e prevenir o uso indevido dos dados fisiológicos.

Assim, as inovações de uso dual deste ecossistema beneficiarão equipes de resposta a desastres, astronautas, atletas de elite e trabalhadores de alto risco. Parcerias público-privadas, financiamento interdisciplinar em Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PD&I) e uma governança transparente dos dados construirão confiança social e resiliência tecnológica.

5.2 Cenário Realista: Adoção Gradual e Atrasos Regulatórios

Neste cenário intermediário, projetado com base em análises críticas sobre tendências tecnológicas e dinâmicas institucionais, os biossensores passam por uma adoção progressiva, ainda que limitada por entraves regulatórios, éticos e infraestruturais. Os sistemas civis de saúde incorporam essas tecnologias prioritariamente no monitoramento de doenças crônicas e em plataformas de telessaúde, enquanto os setores esportivo e ocupacional as empregam para otimização de desempenho e prevenção de lesões.



No domínio militar, observa-se uma adoção gradual, voltada principalmente para o treinamento, simulações e operações de natureza não letal. A integração plena aos equipamentos táticos permanece restrita, devido a problemas persistentes de interoperabilidade, limitações logísticas e financiamento intermitente. Embora os dados fisiológicos sejam coletados e analisados, seu uso em tempo real ainda é dificultado pela ausência de capacidade de processamento local e por preocupações com cibersegurança.

Questões legais e éticas ganham centralidade, especialmente no tocante à propriedade dos dados, à autonomia individual do soldado e aos limites aceitáveis da vigilância fisiológica. Os órgãos reguladores demonstram dificuldade em acompanhar o ritmo de evolução das biointerfaces e dos diagnósticos mediados por inteligência artificial. Paralelamente, os esforços internacionais de harmonização normativa e enfrentamento das implicações de uso dual avançam de forma assimétrica, resultando em implementações fragmentadas entre diferentes regiões.

Apesar dessas limitações estruturais, os biossensores oferecem avanços relevantes para a consciência situacional e estratégias preventivas de saúde, especialmente em forças especiais, programas atléticos de elite e contextos clínicos remotos. Este cenário reflete uma trajetória tecnocientífica de médio alcance, marcada por ganhos localizados, desafios institucionais persistentes e necessidade de coordenação global mais efetiva

5.3 Cenário Pessimista: Riscos de Vigilância e Rejeição Social

Neste cenário, projetado a partir da extrapolação crítica de tendências distópicas e lacunas regulatórias persistentes, os biossensores assumem uma conotação negativa, tornando-se símbolos de vigilância estatal, exploração laboral e controle militarizado. Sua implantação disseminada em contextos civis e militares resulta na erosão sistemática da privacidade, na normalização do monitoramento biométrico e no agravamento de controvérsias éticas relacionadas ao “perfilamento fisiológico”, ou seja, usar os biossensores para mapear padrões neurofisiológicos, categorizando-os em perfis psicobiológicos que podem influenciar decisões operacionais, treinamentos ou promoções, muitas vezes sem consentimento ou transparência.

Sob regimes autoritários, biossensores são instrumentalizados para rastrear dissidentes, impor padrões disciplinares e classificar indivíduos com base em traços neurofisiológicos. No ambiente de trabalho, práticas de rastreamento biométrico são utilizadas para maximizar a produtividade, frequentemente em detrimento da autonomia, saúde mental e bem-estar dos trabalhadores. Em cenários militares, o monitoramento biosensorial compulsório desperta preocupações com coerção, discriminação baseada em indicadores fisiopsicológicos e esgotamento operacional.



A ausência de regulamentações internacionais robustas expõe vulnerabilidades cibiológicas críticas: redes de biossensores tornam-se alvos de manipulação, sabotagem ou desinformação por parte de adversários estratégicos. Plataformas de código aberto são exploradas por biohackers e agentes hostis para engenharia reversa de sensores militares, favorecendo usos ilícitos e ameaças híbridas.

Com isso, a crescente percepção pública de invasão e perda de controle sobre os próprios dados leva à rejeição social dos biossensores em ambientes civis. Em resposta, governos adotam medidas reativas e restritivas, que inibem a inovação e aprofundam divisões geopolíticas quanto ao uso e à governança das tecnologias biointegradas. Este cenário representa um alerta para os riscos decorrentes da ausência de salvaguardas éticas, da concentração de poder informacional e do uso disfuncional de tecnologias sensíveis em contextos de desequilíbrio institucional.

5.4 Implicações Estratégicas

Esses cenários reforçam a urgência de se estabelecer uma governança proativa, ética e colaborativa no desenvolvimento e na aplicação das tecnologias de biossensores. O futuro dessas inovações não está tecnicamente predeterminado, mas será diretamente influenciado pelas decisões tomadas em esferas regulatórias, científicas e operacionais ao longo da próxima década.

Nesse sentido, o planejamento estratégico voltado à integração dos biossensores em sistemas civis e militares deve contemplar investimentos contínuos em arquiteturas tecnológicas que priorizem segurança e ética desde sua concepção, bem como o desenvolvimento de padrões técnicos que assegurem a interoperabilidade entre plataformas e a proteção dos dados pessoais sensíveis. Além disso, é fundamental incorporar a análise prospectiva sobre biossensores aos planejamentos nacionais nas áreas de defesa e saúde pública, garantindo coerência entre inovação, responsabilidade social e preparação institucional. Por fim, devem ser estabelecidos mecanismos eficazes para mitigar os riscos associados ao uso dual dessas tecnologias e prevenir abusos que comprometam direitos fundamentais ou interesses estratégicos.

Em resumo, os biossensores representam tanto uma oportunidade quanto um risco. A maneira como esse equilíbrio será gerido determinará se essas tecnologias fortalecerão a resiliência e o desempenho, ou comprometerão a autonomia e a confiança social.

6. Convergência civil-militar e implicações políticas

A convergência entre aplicações civis e militares das tecnologias de biossensores representa um ponto de inflexão crítico para as políticas públicas em ciência e tecnologia. Embora os



biossensores tenham origem em contextos clínicos e biomédicos, seu uso crescente em ambientes de defesa reflete um padrão mais amplo de inovações de uso dual, em que ferramentas desenvolvidas para monitoramento de saúde e desempenho também são utilizadas para vigilância, controle operacional e otimização de forças. Essa convergência cria oportunidades de sinergia, mas também apresenta desafios significativos relacionados à ética, segurança, governança de dados e alinhamento regulatório (Silva, 2022; Marson *et al.*, 2024).

6.1 Regulamentação de Tecnologias de Uso Dual

À medida que os biossensores amadurecem, sua natureza de uso dual levanta preocupações quanto ao controle de exportação e à regulamentação internacional. Dispositivos capazes de monitorar prontidão cognitiva, biomarcadores de estresse ou estados neurofisiológicos podem ser aplicados em contextos benignos de saúde pública ou em regimes militares coercitivos. Acordos internacionais como o Wassenaar Arrangement (Davis, 1996) e outros regimes de controle de exportações podem precisar ser atualizados para incluir sistemas biointegrados e ferramentas de monitoramento fisiológico potencializadas por IA, que atualmente permanecem em zonas regulatórias cinzentas (Kim, 2022).

A transferência tecnológica entre os setores civil e militar, por meio de parcerias governamentais, colaborações acadêmicas ou programas de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PD&I) privados, deve ser submetida a processos de supervisão claros. A criação de registros públicos de tecnologias de uso dual, acordos transparentes de licenciamento e comitês éticos de avaliação podem ajudar a mitigar os riscos de uso indevido ou desvio de finalidade.

6.2 Cooperação Civil-Militar e Transferência de Tecnologia

Ecossistemas de inovação bem-sucedidos dependem, cada vez mais, de estruturas colaborativas nas quais instituições militares se beneficiam de avanços comerciais em biossensores, enquanto setores civis adotam tecnologias robustas testadas em ambientes extremos. Programas militares de PD&I frequentemente originam tecnologias que são posteriormente aplicadas na segurança ocupacional, cuidados com idosos ou otimização de desempenho esportivo.

Para que essas transferências ocorram de forma ética e responsável, os acordos de compartilhamento de tecnologia devem incluir cláusulas sobre proteção de dados, limitações de uso e prestação de contas pública. Devem ser incentivadas estruturas como polos de inovação e laboratórios conjuntos entre forças armadas e universidades, operando sob supervisão democrática.

6.3 Implicações Éticas, Jurídicas e Sociais



A proliferação de biossensores levanta questões éticas urgentes. Em contextos civis, o usuário geralmente consente com a coleta de dados para fins terapêuticos ou de aprimoramento do desempenho (Bouderhem, 2024). No ambiente militar, contudo, o consentimento informado torna-se problemático, sobretudo em estruturas hierárquicas rígidas ou zonas de combate.

O uso de biossensores em análises preditivas, como a identificação de falhas operacionais potenciais, comportamentos de desobediência ou colapsos psicológicos iminentes, levanta preocupações éticas relevantes, sobretudo quanto à possibilidade de aplicação de medidas disciplinares preventivas ou exclusão de indivíduos com base em perfilamentos gerados por algoritmos. Esse tipo de uso pode comprometer direitos fundamentais, especialmente em contextos hierárquicos como o militar, onde as relações de poder tornam mais tênue a linha entre monitoramento funcional e vigilância coercitiva (Rausch *et al.*, 2022).

Fato exposto, os marcos éticos que regulam o uso dessas tecnologias devem ser suficientemente robustos para delimitar claramente o escopo e os limites do monitoramento em tempo real, garantir aos indivíduos o direito de recusar o rastreamento ou solicitar a anonimização de seus dados biométricos e cognitivos, e estabelecer salvaguardas contra vieses algorítmicos, coerção institucional e possíveis abusos cibernéticos decorrentes da coleta e interpretação automatizada dessas informações sensíveis.

6.4 Privacidade de Dados e Riscos Cibernéticos

Os dados gerados por biossensores são altamente sensíveis, revelando informações sobre estado mental, condições médicas e padrões comportamentais (Marson & Guimarães, 2021). Em contextos civis e militares, esses dados tornam-se simultaneamente ativos estratégicos e pontos vulneráveis. Sem protocolos robustos de criptografia e autenticação, os sistemas de biossensores estão sujeitos à interceptação, falsificação e manipulação (Sedenberg *et al.*, 2017).

Em aplicações de defesa, ataques ciberbiológicos podem incluir bloqueio das comunicações dos sensores, inserção de dados falsos para confundir decisões operacionais ou captura de métricas em tempo real para localização e rastreamento de pessoal (Marson & Guimarães, 2021). No setor civil, os riscos incluem vigilância não autorizada, comercialização de dados por terceiros e uso discriminatório de informações por seguradoras ou empregadores.

As estruturas de segurança nacional devem reconhecer as redes de biossensores como componentes estratégicos da infraestrutura digital crítica, dado seu potencial impacto sobre a integridade informacional, a soberania dos dados e a operacionalidade de sistemas civis e militares. Essa abordagem exige a adoção de arquiteturas de segurança que assegurem comunicações seguras



entre sensores por meio de autenticação contínua, verificação rigorosa de identidade e segmentação da rede (Gayathri & Sathya, 2015).

Complementarmente, deve-se promover a criação e adoção de normas específicas de certificação cibernética para dispositivos médicos vestíveis e implantáveis, assegurando sua conformidade com requisitos de segurança, interoperabilidade e proteção contra ameaças ciberfísicas.

6.5 Autonomia Estratégica e Preparação Nacional

A dependência excessiva de fabricantes estrangeiros de biossensores ou de plataformas proprietárias de gerenciamento de dados representa um risco estratégico à autonomia nacional, afetando diretamente a soberania tanto nas esferas civil quanto militar. Para mitigar esse risco, torna-se essencial que os governos fomentem o desenvolvimento de capacidades nacionais de inovação, incentivem a adoção de padrões tecnológicos abertos e implementem protocolos de armazenamento de dados que respeitem os princípios da soberania digital (Bruckner-Lea, 2004; Graham & Sabelnikov, 2004).

Este estudo projeta que no contexto da defesa, as estratégias de prontidão militar devem contemplar a elaboração de planos de contingência frente a possíveis falhas em sistemas biosensoriais, o emprego de métodos redundantes de monitoramento fisiológico capazes de assegurar a continuidade da coleta e análise de dados críticos, bem como a formação ética de comandantes e oficiais encarregados da gestão de dados, de modo a garantir a integridade, o uso responsável e a proteção das informações sensíveis em operações de alta complexidade.

Em suma, a convergência civil-militar no campo dos biossensores é ao mesmo tempo inevitável e transformadora. Aproveitar seus benefícios e mitigar seus riscos exigirá inovação normativa interdisciplinar, diálogo multissetorial e arcabouços jurídicos voltados para o futuro. Esses passos são essenciais para garantir que os biossensores promovam o desempenho humano sem comprometer direitos, confiança ou segurança.

7 Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PD&I) e Colaboração Interdisciplinar

A natureza de uso dual e o ritmo acelerado de inovação das tecnologias de biossensores exigem abordagens proativas, coordenadas e éticas para pesquisa, desenvolvimento, implantação e governança. Esta seção apresenta recomendações-chave destinadas a orientar os setores civil e militar rumo à integração sustentável, segura e eficaz dos biossensores.

Para concretizar o potencial pleno dos biossensores, é essencial garantir investimento contínuo em pesquisa básica e aplicada, especialmente nas interfaces entre engenharia biomédica, inteligência



artificial e ciências operacionais. Segundo Marson *et al.* (2023) governos, agências de defesa e o setor privado devem priorizar:

- a) Parcerias público-privadas para o desenvolvimento de sistemas de biossensores adaptados a necessidades reais;
- b) Centros interdisciplinares de PD&I que integrem competências em medicina, biomecânica, neurociência e ciência de dados; e
- c) Estudos de campo longitudinais em contextos civis e militares para validar a eficácia, usabilidade e impacto de longo prazo das tecnologias.

7.1 Padrões e Protocolos de Interoperabilidade e Privacidade

Diante da fragmentação e da rápida evolução no desenvolvimento de biossensores, torna-se imprescindível o estabelecimento de padrões técnicos, tanto globais quanto nacionais, que garantam a interoperabilidade entre sistemas, a consistência dos dados gerados e a comunicação segura entre dispositivos (Nomula, 2024). A padronização deve contemplar aspectos como os formatos de dados, os protocolos de calibração dos sensores e as interfaces de programação de aplicações responsáveis pela integração entre diferentes tecnologias; além disso, deve incluir protocolos robustos de segurança cibernética e criptografia que assegurem a confidencialidade e a integridade das informações durante sua transmissão e armazenamento (de Lacerda Filho *et al.*, 2020).

Para tanto, cabe aos órgãos reguladores fomentarem a criação de ambientes experimentais controlados, os chamados *regulatory sandboxes*, nos quais desenvolvedores possam testar novas soluções tecnológicas em conformidade com os requisitos legais e éticos vigentes, promovendo inovação responsável e segura.

7.2 Uso Ético e Marcos Regulatórios para Tecnologias de Uso Dual

A implantação ética de tecnologias biosensoriais, especialmente em contextos hierárquicos ou coercitivos como o ambiente militar, demanda a construção de estruturas sólidas de governança que assegurem o respeito aos direitos individuais e o uso responsável dos dados coletados (Bouderhem, 2024).

Os governos nacionais e coalizões internacionais devem estabelecer comitês de bioética voltados à avaliação crítica do uso de biossensores em cenários operacionais e assistenciais; desenvolvam marcos regulatórios capazes de acompanhar e controlar a transferência de tecnologias de uso dual (Kolstoe, 2021), prevenindo repositórios maliciosos; e elaborem códigos de conduta específicos para comandantes, profissionais da saúde e analistas responsáveis pela interpretação de



dados biosensoriais, com o objetivo de coibir usos indevidos, práticas discriminatórias ou formas abusivas de vigilância.

Assim sendo, tais estruturas devem ser dinâmicas e atualizadas periodicamente, de modo a acompanhar os avanços tecnológicos e as transformações nos cenários político-institucionais em que essas tecnologias são aplicadas.

7.3 Capacitação nos Setores Civil e Militar

Maximizar o valor das tecnologias de biosensores requer não apenas investimentos em infraestrutura técnica, mas também o fortalecimento da capacitação profissional para que os dados gerados sejam corretamente operados, interpretados e utilizados na tomada de decisões (Bruckner-Lea, 2004). Nesse sentido, torna-se essencial a formação contínua de profissionais da saúde, cientistas do esporte e instrutores militares quanto ao uso estratégico das informações provenientes desses dispositivos.

Visando à área militar, isso inclui preparar soldados e comandantes para interpretar alertas fisiológicos e integrar os dados ao planejamento tático sem dependência excessiva ou interpretações equivocadas (Velayutham *et al.*, 2024).

7.4 Inovação Inclusiva e Equidade

Garantir que os benefícios proporcionados pelas tecnologias de biosensores sejam acessíveis a todos os segmentos da sociedade, e não restritos a instituições de elite ou às Forças Armadas, demanda a implementação de políticas públicas orientadas por princípios de equidade, acessibilidade econômica e desenvolvimento centrado no usuário.

Para isso, torna-se fundamental promover o desenvolvimento de sistemas de baixo custo voltados à saúde pública e a ambientes com recursos limitados, incentivar testes comunitários que possibilitem a adaptação das tecnologias a diferentes perfis populacionais e contextos culturais, bem como estabelecer mecanismos de monitoramento e mitigação das disparidades no acesso, com especial atenção a grupos socialmente vulneráveis, militares conscritos e populações residentes em regiões remotas (Warfade *et al.*, 2025).

Essas recomendações buscam equilibrar inovação e responsabilidade que vise institucionalizar a prospectiva ética, o rigor técnico e a governança inclusiva, as instituições civis e militares poderão assegurar que os biosensores sirvam ao empoderamento humano, à prontidão operacional e à proteção de direitos fundamentais em um cenário tecnológico em rápida transformação (Papaioannou, 2018).



8 Considerações Finais

As tecnologias de biossensores estão na vanguarda de uma profunda transformação na forma como a saúde humana, o desempenho físico e os estados cognitivos são medidos, monitorados e otimizados. Conforme demonstrado neste estudo de prospectiva, a convergência entre biossensores, inteligência artificial, sistemas vestíveis e análises em tempo real abriu uma nova fronteira tanto no domínio civil quanto militar.

A partir de suas aplicações iniciais em diagnósticos clínicos e ciência do esporte, os biossensores evoluíram para ferramentas poderosas capazes de apoiar a tomada de decisão operacional, aprimorar o desempenho e viabilizar estratégias de vigilância preventiva em saúde. Sua natureza de uso dual, aplicável simultaneamente em sistemas de saúde e operações de defesa, representa tanto uma oportunidade estratégica quanto um desafio regulatório. No contexto militar, os biossensores podem aumentar a prontidão da missão, reduzir o risco de lesões e fornecer alertas precoces de fadiga ou sobrecarga fisiológica. No setor civil, essas mesmas tecnologias prometem avanços na medicina personalizada, no gerenciamento de doenças crônicas e na segurança do trabalho.

Este estudo apresentou uma avaliação abrangente das tecnologias atuais, tendências emergentes e aplicações intersetoriais. Por meio de ferramentas metodológicas como *horizon scanning*, análise de Níveis de Maturidade Tecnológica (TRL) e cenários prospectivos, foram delineados três futuros plausíveis: um cenário positivo de integração ética e interoperabilidade; uma trajetória intermediária de adoção fragmentada e atraso regulatório; e um cenário crítico marcado por riscos de vigilância e rejeição social.

Para avançar na direção do cenário mais desejável, são necessárias várias ações fundamentais: intensificar o investimento em PD&I interdisciplinar, estabelecer padrões de privacidade e cibersegurança, desenvolver marcos regulatórios éticos e específicos para uso dual, além de promover a capacitação técnica e crítica de todos os atores envolvidos.

Mais importante ainda, os biossensores devem ser implementados de forma a preservar a autonomia individual, proteger a privacidade e promover a equidade. No contexto militar, isso significa respeitar os limites fisiológicos e psicológicos dos integrantes das Forças Armadas, ao passo que no contexto civil, requer garantir que os benefícios tecnológicos sejam acessíveis a diferentes camadas sociais e regiões geográficas.

À medida que as décadas avançam, a importância estratégica dos biossensores só tende a crescer e aqueles que forem capazes de antecipar suas trajetórias, estabelecer salvaguardas éticas e investir em inovação inclusiva estarão mais bem posicionados para aproveitar todo o seu potencial.



Este estudo de prospectiva funciona, assim, como um roteiro e um chamado à ação, convidando os formuladores de políticas, cientistas e líderes institucionais a moldar o futuro desta tecnologia de forma segura, ética e resiliente.



Referências

- AIDMAN, Eugene. Cognitive fitness framework: towards assessing, training and augmenting individual-difference factors underpinning high-performance cognition. **Frontiers in human neuroscience**, v. 13, p. 466, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3389/fnhum.2019.00466>.
- ALMER, Alexander *et al.* Real-time remote stress monitoring based on specific stress modelling considering load characteristics of different military forces. **Cognitive Computing and Internet of Things**, v. 73, p. 83-92, 2023. DOI: <http://doi.org/10.54941/ahfe1003977>.
- ALPYSBAYEV, Kaisar; ALPYSBAYEV, Serik. Foresight technologies and strategic planning: interaction effect. **Education Quality Assurance**, p. 33-40, UDC 378, 2023. DOI: https://doi.org/10.58319/26170493_2023_1_33.
- ANTONY, Anita. Flexible and wearable biosensors: revolutionizing health monitoring. In: **Biosensors: Developments, Challenges and Perspectives**. Singapore: Springer Nature Singapore, p. 237-258, 2024. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-97-3048-3_12.
- BOUDERHEM, Rabia. Ethical and Regulatory Challenges for AI Biosensors in Healthcare. **Proceedings**, v. 104, n. 1, p. 37, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/proceedings2024104037>.
- BRUCKNER-LEA, Cindy. Biosensor systems for homeland security. **The Electrochemical Society Interface**, v. 13, n. 2, p. 36-42, 2004. DOI: 10.1149/2.f06042if. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1149/2.F06042IF>.
- CHENG, Jianqun *et al.* Advancements in Wearable Sensor Technology for Remote Health Monitoring. In: **2024 IEEE 10th World Forum on Internet of Things (WF-IoT)**, p. 1-5, 2024. DOI: [10.1109/WF-IoT62078.2024.10811387](https://doi.org/10.1109/WF-IoT62078.2024.10811387).
- DALLOUL, Ahmed Hany; MIRAMIRKHANI, Farshad; KOUHALVANDI, Lida. A review of recent innovations in remote health monitoring. **Micromachines**, v. 14, n. 12, p. 2157, 2023. DOI: [10.3390/mi14122157..](https://doi.org/10.3390/mi14122157)
- DAVIS, Lynn E. The Wassenaar Arrangement. **Department of State Dispatch**, v. 7, p. 76-79, 1996. Disponível em: <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA496568.pdf>.
- DE LACERDA FILHO, Eduardo Magalhães *et al.* Improving data security, privacy, and interoperability for the IEEE biometric open protocol standard. **IEEE Access**, v. 10, p. 26985-27001, 2020. DOI: [10.1109/ACCESS.2020.3046630](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3046630).
- FARZIN, Mohammad Ali; NAGHIB, Seyed Morteza; RABIEE, Navid. Advancements in bio-inspired self-powered wireless sensors: Materials, mechanisms, and biomedical applications. **ACS Biomaterials Science & Engineering**, v. 10, n. 3, p. 1262-1301, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsbiomaterials.3c01633>.
- FRIEDL Karl E. Military applications of soldier physiological monitoring. **Journal of Science Medicine Sport**, v. 21, n. 11, p. 1147-1153, 2018. DOI: [10.1016/j.jsams.2018.06.004..](https://doi.org/10.1016/j.jsams.2018.06.004)
- GAYATHRI, C., & SATHYA, D. Protection of security and privacy for medical data in wireless medical sensor networks. **IJARSE**, v.1, n. 4, Special Issue (01), p. 372-379, 2015. Disponível em: https://www.ijarse.com/images/fullpdf/1425804513_415.pdf.
- GIBSON, Elizabeth *et al.* Technology foresight: A bibliometric analysis to identify leading and emerging methods. **Форсайт**, v. 12, n. 1 (eng), p. 6-24, 2018. Disponível em: https://pdxscholar.library.pdx.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1156&context=etm_fac.
- GOMATHY, DR. C.; GEETHA, DR. V.; BATHRINATHAN, S. R.; SRIPADA, S. K. Exploring the ethical considerations of biometrics in cybersecurity. **IJREM**, v. 8, n. 9, p. 1-5, 2024. DOI: [10.55041/IJSREM37507](https://doi.org/10.55041/IJSREM37507).

GRAHAM, Thomas W.; SABELNIKOV, Alexander G. How Much is Enough: Real-time detection and identification of biological weapon agents. **Journal of Homeland Security and Emergency Management**, v. 1, n. 3, 2004. DOI: <https://doi.org/10.2202/1547-7355.1017>.

HE, Congying; CHANG, Yang; KO, Li-Wei. Brain-Computer Interface for Multi-Parameter Mental State Evaluation. In: **2022 International Conference on Fuzzy Theory and Its Applications (iFUZZY)**, p. 01-05, 2022. DOI: [10.1109/iFUZZY55320.2022.9985229](https://doi.org/10.1109/iFUZZY55320.2022.9985229).

HU, Margaret. Biometric ID cybersurveillance. **Indiana Law Journal**, v. 88, p. 1475-558, 2013. Disponível em: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2041946.

KIM, Hee Jin. Regulating Surveillance Technology through the Wassenaar Arrangement – Some Implications for Dual-Use Export Controls under the Foreign Trade Act of Korea. **International Law Review**, v.61, p. 37–63, 2022. DOI: <https://doi.org/10.25197/kilr.2022.61.37>.

KOLSTOE, Simon E. A framework for reviewing dual use research. In: **Ethical Issues in Covert, Security and Surveillance Research**. Emerald Publishing Limited, v. 8, p. 131-143, 2021. DOI: [10.1108/S2398-601820210000008010](https://doi.org/10.1108/S2398-601820210000008010).

KUMAR, Siddhant; UPADHYAY, Sarthak; JINDAL, Sanskar; SHARMA, Upasana. Health Monitoring Systems for Military Personnel Using Sensor-based Systems. **IJRASET**, v. 12, n. V, p. 3805-11, 2024. DOI: <https://doi.org/10.22214/ijraset.2024.62455>.

LAARNI, Jari *et al.* Promoting soldier cognitive readiness for battle tank operations through bio-signal measurements. In: **Advances in Neuroergonomics and Cognitive Engineering: Proceedings of the AHFE 2019 International Conference on Neuroergonomics and Cognitive Engineering, and the AHFE International Conference on Industrial Cognitive Ergonomics and Engineering Psychology, July 24-28, 2019, Washington DC, USA 10**. Springer International Publishing, p. 142-154, 2020. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-20473-0_15.

MALASINGHE, Lakmini P.; RAMZAN, Naeem; DAHAL, Keshav. Remote patient monitoring: a comprehensive study. **Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing**, v. 10, p. 57-76, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/S12652-017-0598-X>.

MARSON, R. A.; GUIMARÃES, R. W. A. Estudo Prospectivo sobre Biossensores de Aplicação Militar. **Revista Agulhas Negras**, v. 5, n. 5, p. 1-13, 23 jun. 2021. DOI: <https://doi.org/10.70545/ran.v5i5.6928>.

MARSON, R. A.; ROESLER, R.; BARROS JUNIOR, A. J. Avanços Tecnológicos para o Desempenho Físico do Soldado. **Revista Agulhas Negras**, v. 7, n. 9, p. v-viii, 31 jul. 2023. DOI: <https://doi.org/10.70545/ran.v7i9.11987>.

MARSON, R. A.; ROESLER, R.; BARROS JÚNIOR, A. J. Preparação Militar no Século XXI: Prontidão, desempenho físico e resiliência. **Revista Agulhas Negras**, v. 8, n. Especial, p. v-x, 10 abr. 2025. DOI: <https://doi.org/10.70545/ran.v8iEspecial.13365>.

NOMULA, Varun Kumar. Imperative of Standards and Interoperability in Modern Medicine. **FMDB Transactions on Sustainable Health Science Letters**, v. 2, n. 1, p. 31–40, 2024. DOI: <https://doi.org/10.69888/ftshsl.2024.000170>.

PAPAIOANNOU, Theo. **Inclusive innovation for development: meeting the demands of justice through public action**. Routledge, 2018. Disponível em: <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.4324/9780203729724/inclusive-innovation-development-theo-papaioannou>.

POHANKA, Miroslav. Current trends in the biosensors for biological warfare agents assay. **Materials**, v. 12, n. 14, p. 2303, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/MA12142303>.



RAUSCH, Monika *et al.* Biosensors supporting healthcare in missions—expert consensus on the status of implementation in the military and future tasks. **Health Promotion & Physical Activity**, v. 20, n. 3, p. 29-35, 2022. DOI: <https://doi.org/10.55225/hppa.438>.

RAY, Tyler R. *et al.* Bio-integrated wearable systems: a comprehensive review. **Chemical reviews**, v. 119, n. 8, p. 5461-5533, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1021/ACS.CHEMREV.8B00573>.

SEDENBERG, Elaine; RICHMOND Wong; JOHN Chuang. A window into the soul: Biosensing in public. **Surveillance, privacy and public space**. Routledge, p. 75-98, 2017.

SILVA, Jose Miguel Martinho. **Incorporação de Biosensores no Soldado do Futuro** (Doctoral dissertation). Academia Militar, Lisboa. 2022

VEENSTRA, Bertil *et al.* **Ambulant Measurements of Physiological Status and Cognitive Performance during Sustained Operations**. Royal Netherlands Army, Training Medicine and Training Physiology, 2009. Disponível em: <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA568120.pdf>.

VELAYUTHAM, Jayasudha; MARIAPPAN, Siva Ananth; MANICKAM, Pandiaraj. Emerging (bio) sensor technologies for monitoring vital markers of military, mining, and defense healthcare. In: **Health and Environmental Applications of Biosensing Technologies**. Elsevier, p. 393-412, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/b978-0-443-19039-1.00018-3>.

WARFADE, Tejaswini S.; DHOKE, Akash P.; KITUKALE, M. D. Biosensors in healthcare: Overcoming challenges and pioneering innovations for disease management. **World Journal of Biology Pharmacy and Health Sciences**, v. 21, n. 1, p. 350-358, 2025. DOI: <https://doi.org/10.30574/wjbphs.2025.21.1.0047>.